
ЕТАЛОН ОДИНИЦІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ НАПРУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ НА ОСНОВІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Гуз Ю.М.¹, Добролюбова М.В.¹, Артюхова Ю.В.¹, Струніна Ю.А.¹,

Боднарук В.І.² Тащук Д.Д.²

¹Національний технічний університет України «КПІ»,

просп. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна;

²Інститут термoeлектрики вул. Науки, 1,

Чернівці, 58029, Україна)

- Показано результати досліджень термopеретворювачів типу ТВБ і ДТПТ на стабільність і погрішність різнополярності, а також шляхи схемного й алгоритмічного вдосконалення при їх використанні в складі еталона одиниці електричної напруги від 0.1 до 1000 В змінного струму в діапазоні частот від 10 Гц до 30 МГц, розробленого в НІІ АЕІ НТУУ «КПІ».

Вступ

Актуальним є питання забезпечення єдності вимірів, основа якого – система державних і первинних еталонів, що забезпечують відтворення певної фізичної величини й передачу розміру її одиниці робочим і/або вихідним еталонам, від яких розмір одиниці цієї величини передається робочим засобам виміру. Потрібне постійне вдосконалення систем вимірів, контролю й випробувань при розробці, виробництві й застосуванні продукції.

Як відомо, еталон повинен мати найвищі метрологічні характеристики серед засобів виміру даної одиниці, які є в державі, на підприємствах, в організаціях або установах [1, 2]. Найвищі метрологічні характеристики еталону забезпечуються завдяки різним методам підвищення точності, а саме: конструктивно-технологічним, захисно-запобіжним і структурно-алгоритмічним. Інакше кажучи, у комплект апаратури еталона мають входити складові, що володіють високою точністю, надійністю й найчастіше багатофункціональністю. При цьому досить вагомим критерієм є вартість використовуваного устаткування.

Державний еталон змінного струму України в цей час не забезпечує відтворення струму в дуже важливому для радіотехнічних приладів діапазоні частот 1 МГц – 30 МГц за рівня напруги до 30 В. Крім того, державний еталон України періодично калібрується в Німеччині. Тому створення еталона одиниці напруги змінного струму для широкого діапазону частот є актуальним завданням.

Напруга змінного струму досить складна величина, тому що немає фізичного явища, яке створювало б середньоквадратичне значення напруги змінного струму.

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

де T – період сигналу, n – кількість періодів, $U(t)$ – залежність напруги від часу.

У більшості Національних Метрологічних Інститутів (НМІ) [3] в основу відтворення одиниці напруги змінного струму покладений процес його порівняння з відомим значенням напруги постійного струму, тобто передача малої невизначеності одиниці напруги постійного струму на змінний струм.

Відмінність національних еталонів різних країн полягає в обґрунтуванні похибки

відтворення середньоквадратичного значення змінної напруги.

Основними джерелами похибок для еталонів термокомпараторного типу є [4, 5]:

- похибка переходу від напруги постійного струму до напруги змінного струму, яка обумовлена фундаментальними явищами Томсона й Пельтьє;
- частотна похибка, обумовлена впливом вихрових струмів, наявністю реактивних складових опору як у самих термоперетворювачах, так і в додаткових опорах, елементах сполуки, перемикачах і т.д.;
- похибка різночасового порівняння, обумовлена порівнянням у різні моменти часу постійної й змінної напруг;
- похибка відтворення постійної напруги, яка використовується як передана одиниця середньоквадратичного значення постійної напруги;
- сумарна похибка інших складових комплексу апаратури, за допомогою яких реалізується передача одиниці від постійної напруги до змінного.

Спільними зусиллями Інституту термоелектрики (Чернівці) і Чернівецького національного університету ім. Ю. Федьковича розроблено й впроваджено у виробництво базові конструкції низки напівпровідникових диференціальних перетворювачів струму (ДТП) і напруги (ДТПН) [6]: ДТП503-(1-5) (похибка компарування на частотах $\leq 0.003\%$ (1 кГц), $\leq 0.005\%$ (20 Гц – 100 кГц)), ДТПН-2401–2403 (похибка компарування на частотах $\leq 0.003\%$ (1 кГц), $\leq 0.01\%$ (20 Гц – 100 кГц), $\leq 0.3\%$ (100 кГц – 30 МГц)), ДТП-1305 (похибка компарування на частотах $\leq 0.01\%$ (20 Гц – 100 кГц), $\leq 0.02\%$ (100 Гц – 200 кГц), $\leq 0.1\%$ (20 кГц – 1 МГц)).

У ФДУП ННДП «Кварц» розроблений і впроваджений у виробництво комплект електротеплових перетворювачів В9-14 для високоточного виміру сигналів змінної напруги низьких і високих частот [7] (замість застарілих виробів ПНТЕ-6 і ПНТЕ-12), які не вимагають застосування допоміжного устаткування (мікрвольтметрів і калібраторів постійної напруги), мають малу теплову інерційність і стійкі до впливу значних перевантажень, а також мають високі метрологічні характеристики: межа основної похибки перетворення, що допускається 0.01%, частотний діапазон 10 Гц – 200 МГц.

Точність виміру величин змінного струму залежить від якості термоелектричних перетворювачів.

У термоперетворювачів, які використовуються для метрологічних цілей, нагрівач і терморпара близькі за геометричними розмірами, тому теплопровідність терморпари має значний вплив на розподіл температури уздовж нагрівача. Для характеристики термоперетворювача введено поняття вольт-ватної чутливості S_w термоперетворювача, яке враховує теплофізичні процеси, що відбуваються в терморпарі.

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

де σ_T – електропровідність матеріалу терморпари, Z_T – термоелектрична ефективність матеріалу терморпари, F – коефіцієнт, який характеризує раціональність використання тепла в конструкції термоперетворювача.

Формула (2) відповідає виразу для ККД термоелектричного генератора за малих перепадів температур на термоелементах і в припущенні, що параметри матеріалу терморпари не залежать від температури. Більш точний вираз для S_{KE} може бути записаний у вигляді

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

Тут T_X і T_G – температура холодного й гарячого спаю термопари.

З аналізу формул (2) і (3) випливає, що основні експлуатаційні параметри термоелектричного перетворювача задаються термоелектричною ефективністю матеріалу термопари ZT , робочим перепадом температури ΔT і коефіцієнтом F .

Значне поліпшення експлуатаційних і метрологічних параметрів термоперетворювачів у наш час можливо тільки шляхом збільшення термоелектричної ефективності матеріалу термопари ZT . У міру росту ZT чутливість перетворювача збільшується. Особливо суттєве це збільшення з переходом від металевих сплавів до напівпровідникових. Наприклад, якщо для хромель-копелевої термопари чутливість $S_W = 4.2$ В/Вт, то для сплавів Bi_2Te_3 вона досягає 92 В/Вт, тобто зростає майже в 20 разів. Аналогічно зростають параметри, які використовуються для оцінки термоперетворювачів R , S_{KE} , E_T .

На можливість підвищення чутливості термоелектричних перетворювачів у використанні напівпровідникових матеріалів, які мають більший коефіцієнт термоЕРС α , зазначено й у праці Т.Б. Рождественского [8].

Застосування напівпровідникових матеріалів створює сприятливі передумови для створення перетворювачів із граничними значеннями чутливості, які обмежуються тільки флуктуаційними шумами.

Важливою характеристикою, яка визначає точність і експлуатаційні можливості, є температурна похибка. Вона визначається величиною відносної зміни вихідної термоЕРС зі зміною температури навколишнього середовища:

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

де E_{t_2} , E_{t_1} – термоЕРС перетворювача, які відповідають температурам t_1 , t_2 .

Для опису температурної залежності термоЕРС термоперетворювачів використовують вираз

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

де α_T – коефіцієнт термоЕРС термопари, R_T – опір термопари, R_H – опір нагрівача, ρ – питомий опір нагрівача, l – довжина нагрівача, d – поперечний переріз нагрівача, R_0 – теплопровідність нагрівача, α – температурний коефіцієнт опору нагрівача, β – температурний коефіцієнт теплопровідності, T – температура навколишнього середовища, γ – температурний коефіцієнт термоЕРС термопари, Z, M, N, P – члени, які описують зміну температури за рахунок зміни опору нагрівача, зміни теплопровідності нагрівача, випромінювання, зміни теплопровідності термопари; у силу громіздкості вони не наведені в нашій праці.

Аналіз виразів для температурної залежності термоЕРС показує, що найбільший внесок у температурну похибку вносять температурні властивості матеріалів нагрівача й термопари, а зміни, обумовлені температурною залежністю випромінювання, відіграють меншу роль.

Із застосовуваних для виготовлення нагрівачів матеріалів манганін має найменшу

залежність параметрів від температури. Однак у конструкціях термоперетворювачів з металевими термопарами нагрівачі з манганіну не застосовуються. Це обумовлене такими причинами: а) за нагрівання понад 120°C у манганіні відбуваються необоротні зміни, які призводять до зміни питомого опору й температурного коефіцієнта; б) величина питомого опору манганіну не дає можливості формувати короткі високоомні нагрівачі.

Перетворювачі з термоелементами з напівпровідникових матеріалів мають одну принципово важливу перевагу перед металевими – досягнення необхідного вихідного сигналу 10 ÷ 15 мВ можливо за значно меншого перегріву нагрівача (10 ÷ 20°C).

Для забезпечення малої температурної похибки напівпровідниковий матеріал необхідно оптимізувати таким чином, щоб компенсувати зміни температури спаю термопари, яка підігрівается манганіновим нагрівачем зі зміною температури навколишнього середовища, й забезпечувати незмінність вихідної термоЕРС у заданому температурному інтервалі (наприклад, – 5 ÷ 35°C). Тобто, для температурних властивостей нагрівача й термопари повинна виконуватися рівність

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

де ρ_H – питомий опір матеріалу нагрівача, κ_H – коефіцієнт теплопровідності матеріалу нагрівача, α_T – коефіцієнт термоЕРС матеріалу термопари, κ_T – коефіцієнт теплопровідності матеріалу термопари, t – набуває значення 50 ÷ 60°C, c – постійна величина.

У перетворювачах ДТПТ-6 використовуються нагрівачі з манганінового мікродроту й термопари з оптимізованого напівпровідникового матеріалу, що робить можливим використовувати термоперетворювачі ДТПТ-6 у побудові еталонних перетворювачів напруги.

Керуючись світовими тенденціями й державними потребами в питаннях повноти системи еталонів електричних величин у цілому й точності виміру електричних величин змінного струму зокрема, колектив НДІ АЕД НТУУ «КПІ» розробив військовий вторинний еталон одиниці електричної напруги від 0.1 до 1000 В змінного струму в діапазоні частот від 10 Гц до 30 МГц.

1. Дослідження перетворювачів ТВБ і ДТПТ-6 на стабільність і похибку різнополярності

Основним вузлом еталона напруги термокомпараторного типу є перетворювач напруги термоелектричний. Комплекти саме таких перетворювачів (ЕПНТЕ й ППНТЕ) і були розроблені в НІІ АЕІ НТУУ «КПІ».

Комплект ЕПНТЕ застосовується для термокомпарації напруги постійного струму з напругою змінного струму. ЕПНТЕ є еталонами порівняння з іншими еталонами й складаються з послідовно з'єднаних: додаткового резистора, ПНТЕ типу ДТПТ-6 і додаткового опору, змонтованих в одному корпусі.

Комплект ППНТЕ призначений для використання в нестаціонарних умовах. ППНТЕ конструктивно співпадає з ЕПНТЕ, крім того, що в ППНТЕ замість ПНТЕ типу ДТПТ-6 використані ПНТЕ типу ТВБ-3.

В обох комплектах застосовані спеціально відібрані термоперетворювачі за ознакою мінімуму похибки асиметрії за дії різнополярної напруги й максимуму короткочасної стабільності. Виготовлені ізоляції з високотеплопровідної кераміки сприяють короткочасній стабільності.

У створенні таких комплектів використовувалися конструктивно-технологічні методи підвищення точності, до яких належать критерії нестабільності й різнополярності [9, 10]. За цими критеріями визначалося, чи може ввійти до складу ЕПНТЕ й ППНТЕ той або інший досліджуваний

термоперетворювач. При цьому розглядалися доступні типи найпоширеніших теплових перетворювачів, таких як вакуумні однотермопарні перетворювачі типу ТВБ-3 і ТВБ-4; диференціальні термоперетворювачі ДТПТ-6, перетворювачі напруги термоелектричні ПНТЕ-6, на основі вакуумних однотермопарних перетворювачів типу ТВБ, багатоелементний плівковий термоперетворювач РТВ, перетворювачі напруги термоелектричні ПНТЕ-12, перетворювачі напруги термоелектричні ПНТЕ-12/2, розроблені еталонні перетворювачі напруги термоелектричні різних номіналів. ТВБ-3, ТВБ-4, ДТПТ-6 аналізувалися з метою «відбраковування» і досліджувалися на відсоток виходу термопар кожного типу, критерії різнополярності й стабільності яких були б прийнятними для того, щоб увійти до складу ЕПНТЕ й ППНТЕ.

1.1 Дослідження вакуумних однотермопарних перетворювачів типу ТВБ

Термоперетворювачі вакуумні безконтактні (ТВБ) завдяки їх широкополосності дуже поширені при відтворенні й передачі одиниці Вольт напруги змінного струму. Одним з найбільш істотних недоліків ТВБ є неоднаковість вихідної термоЕРС зі зміною полярності того самого за значенням постійного струму через явища Томсона й Пельтьє. У режимі термокомпарування через це виникає похибка передачі значення постійного струму до змінного.

Було проведено дослідження партій ТВБ-3, ТВБ-4 на похибку від різнополярності за номінальних струмів $1.0 I_n$, $0.5 I_n$ і $0.3 I_n$. Отримані диференціальні й інтегральні гістограми похибок (рис. 1 – 4), з яких очевидно, що тільки 10% ТВБ мають похибку різнополярності менше 100 ppm, 20% менше 200 ppm, 50% менше 500 ppm, тобто кількість ТВБ, придатних для використання в еталонній апаратурі, зовсім невелика.

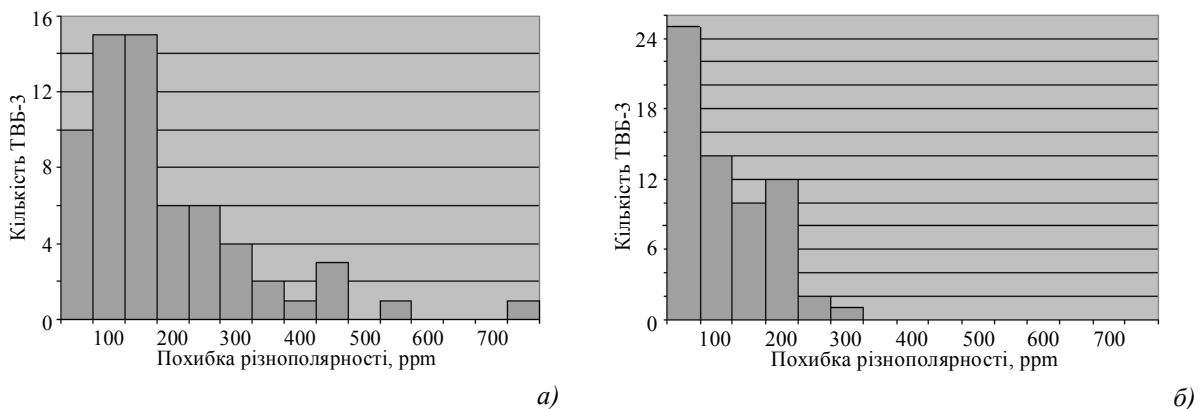


Рис. 1. Диференціальна гістограма похибки різнополярності ТВБ-3 за 3 мА (а) й 5 мА (б).

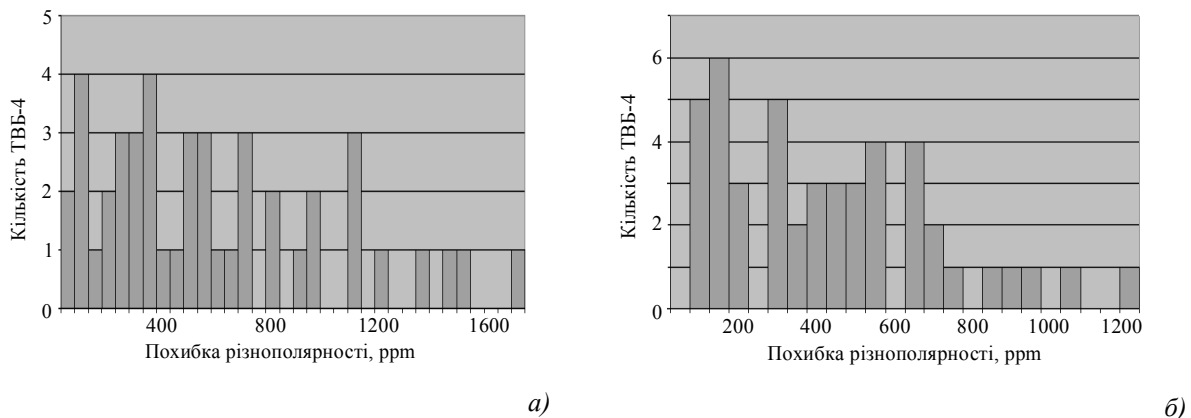


Рис. 2. Диференціальна гістограма похибки різнополярності ТВБ-4 при 5 мА (а) й 10 мА (б).

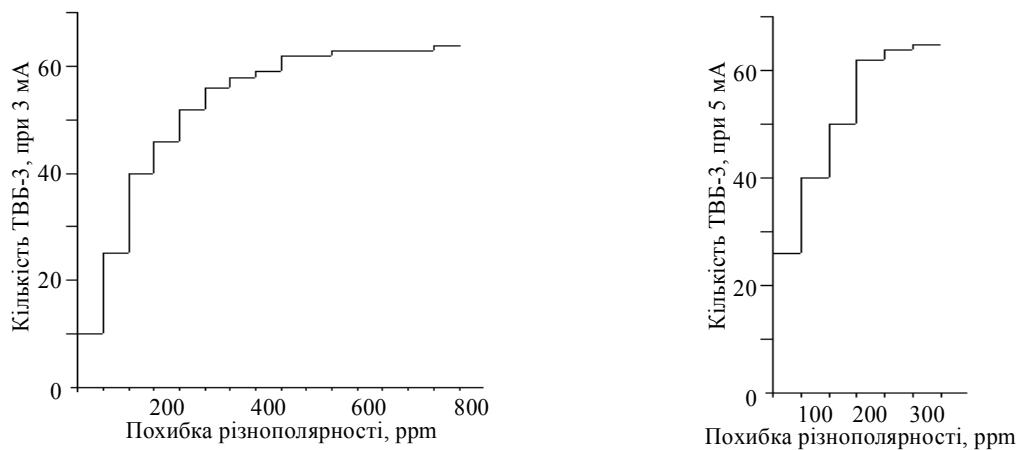


Рис. 3. Інтегральна гістограма похибки різнополярності ТВБ-3 за 3 мА й 5 мА.

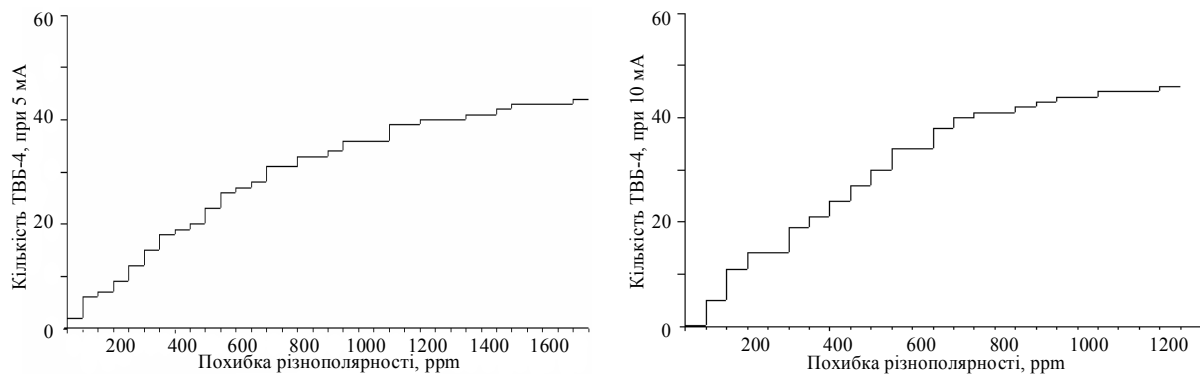


Рис. 4. Інтегральна гістограма похибки різнополярності ТВБ-4 при 5 мА й 10 мА.

1.2 Дослідження диференціальних термперетворювачів типу ДТПТ-6

Також проведено дослідження партій ДТПТ-6 на похибку від різнополярності за номінальних напруг 5 В і 8 В (відповідно струми 5 мА й 8 мА).

Аналіз диференціальних і інтегральних гістограм похибок різнополярності (рис. 5 – 6) показав, що близько 80% ДТПТ-6 мають похибку різнополярності меншу 100 ppm, що набагато краще, ніж для ТВБ. Тому їх було використано у виготовленні комплекту ЕПНТЕ.

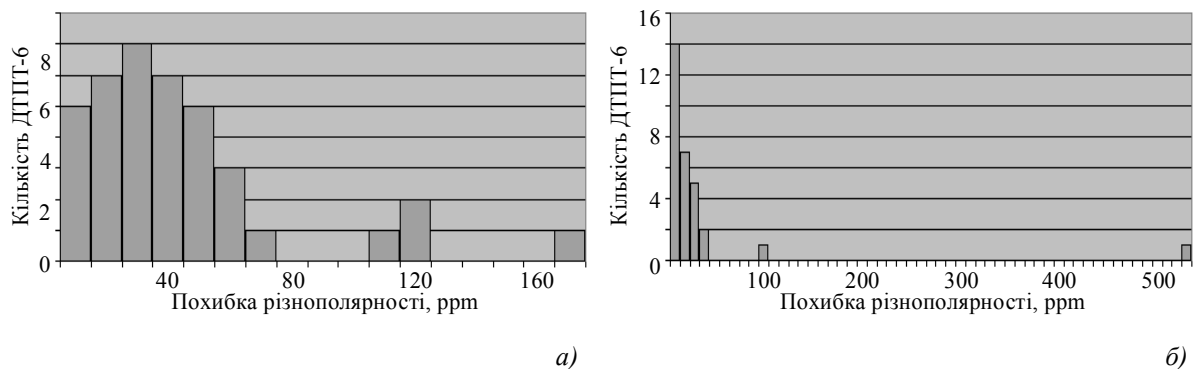


Рис. 5. Диференціальна гістограма похибки різнополярності ДТПТ-6 за 5 В і 8 В.

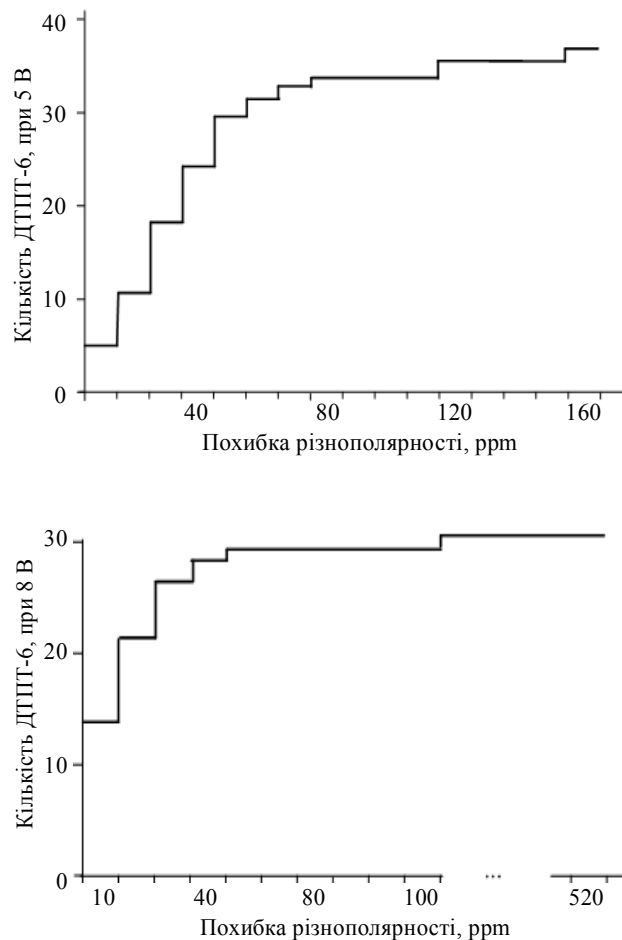


Рис. 6. Інтегральна гістограма похибки різнополярності ДТТТ-6 за 5 В і 8 В.

1.3 Підходи, використані для зменшення похибок

Для зменшення похибки різнополярності було запропоновано послідовне або паралельне включення нагрівачів двох однотермопарних перетворювачів із близькими, але протилежними похибками різнополярності й послідовним включенням термопар. За великої кількості термоперетворювачів можна компенсувати похибки різнополярності в парах, використовуючи практично всі термопари, одержавши тим самим кількість еталонних перетворювачів, що доходить до половини наявних.

Інший радикальний метод зменшення погрішності переходу – калібрування термоперетворювачів напругою відомої форми, ефективно значення якого може бути обчислене аналітично. НІІ АЕД НТУУ «КПІ» запатентований перетворювач напруги в інтервалі часу, що дає можливість здійснити необхідне калібрування й вносити поправку окремо для кожного ТВБ [11].

Для мінімізації частотної похибки вдосконалена конструкція ПНТЕ, у якій мінімізована індуктивна складова опору. Створено автоматичну систему визначення різниці частотних похибок ПНТЕ, що використовує мультиплікативний алгоритм, завдяки чому знижені вимоги до стабільності джерел змінної напруги.

Суттєво поліпшено параметри вимірювачів постійної напруги. Їх роздільну здатність доведено до 100 пВ, основну похибку зменшено до одиниць ppm.

Це робить можливим працювати за менших термоЕРС і розширити динамічний діапазон.

Суперечність між нестабільністю й часом установаження зменшується відмовою від нульового термокомпарування й виміром на околицях установаженого значення з обчисленням коефіцієнтів апроксимуючого полінома для додатної й від'ємної віток параболи, а також знаходженням значення змінної напруги як усередненого кореня апроксимуючих поліномів.

Результати експериментальних досліджень стабільності коефіцієнтів перетворення для ТВБ-3 показано на рис. 7, для ТВБ-4 – на рис. 8, для ДТПТ-6 – на рис. 9 – 12.

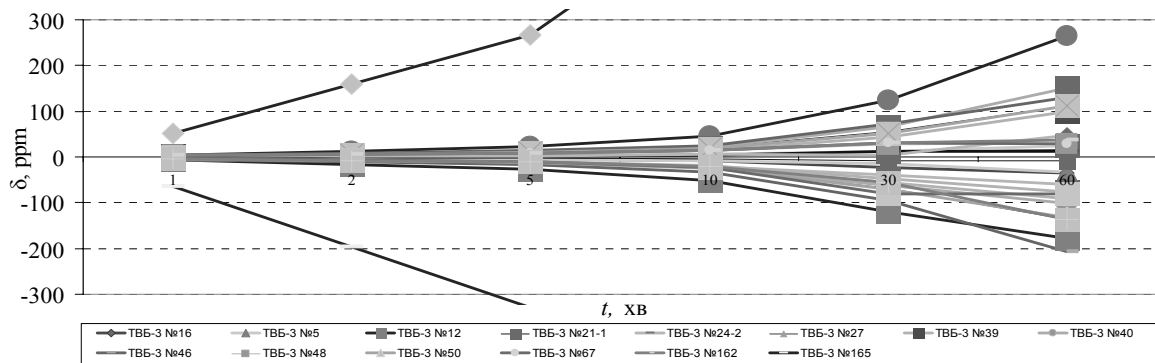


Рис. 7. Графік залежності усереднених відхилень коефіцієнтів перетворення від часу спостереження для ТВБ-3.

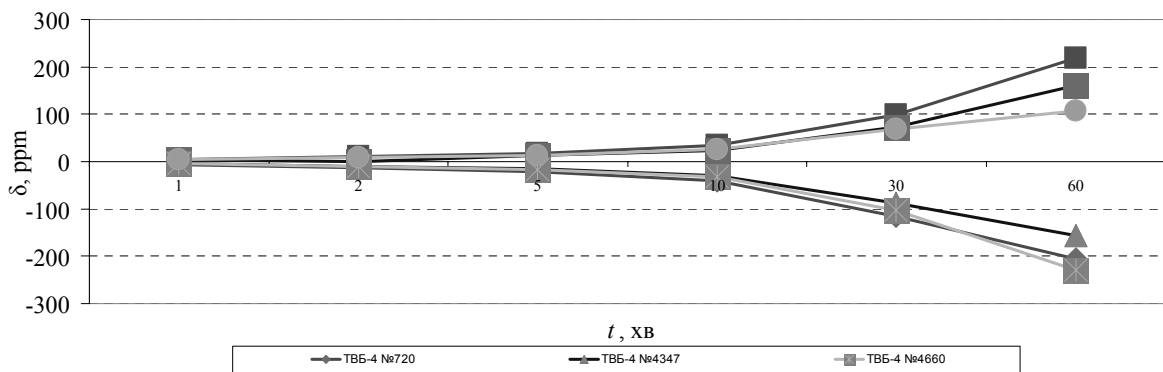


Рис. 8. Графік залежності усереднених відхилень коефіцієнтів перетворення від часу спостереження для ТВБ-4.

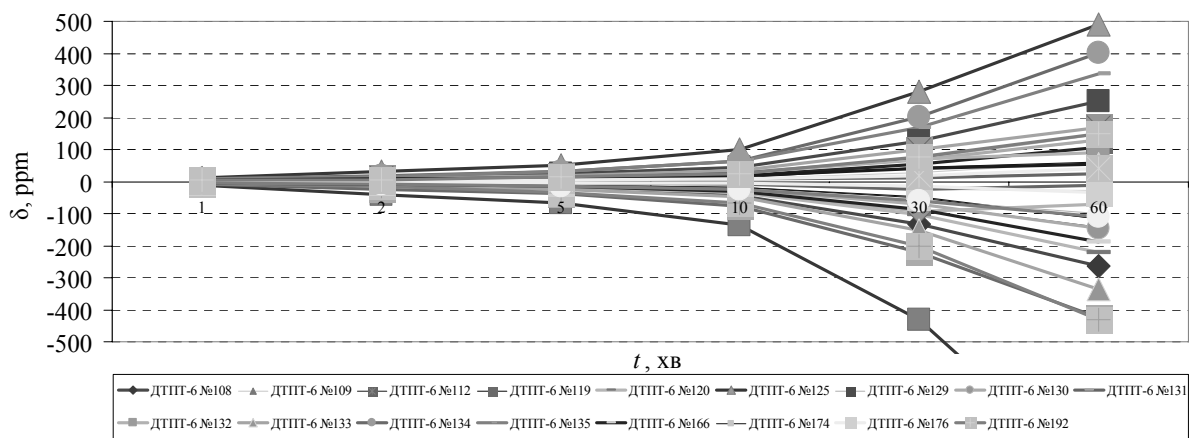


Рис. 9. Графік залежності усереднених відхилень коефіцієнтів перетворення від часу спостереження для ДТПТ-6 (5 В, 1-й нагрівач).

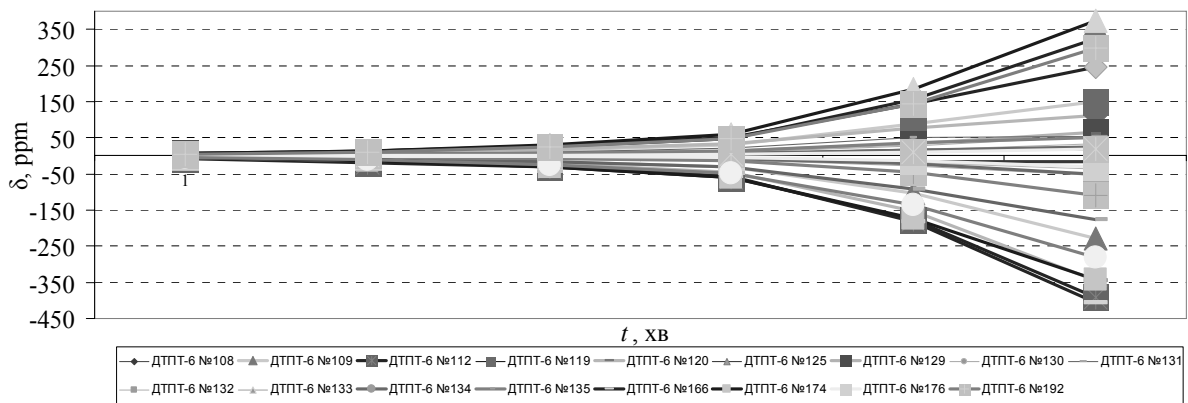


Рис. 10. Графік залежності усереднених відхилень коефіцієнтів перетворення від часу спостереження для ДТПТ-6 (5 В, 2-й нагрівач).

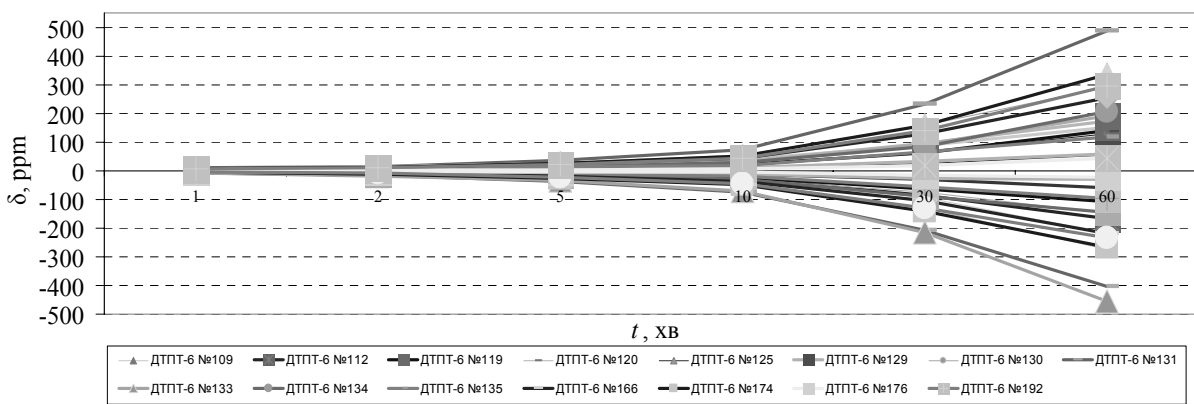


Рис. 11. Графік залежності усереднених відхилень коефіцієнтів перетворення від часу спостереження для ДТПТ-6 (8 В, 1-й нагрівач).

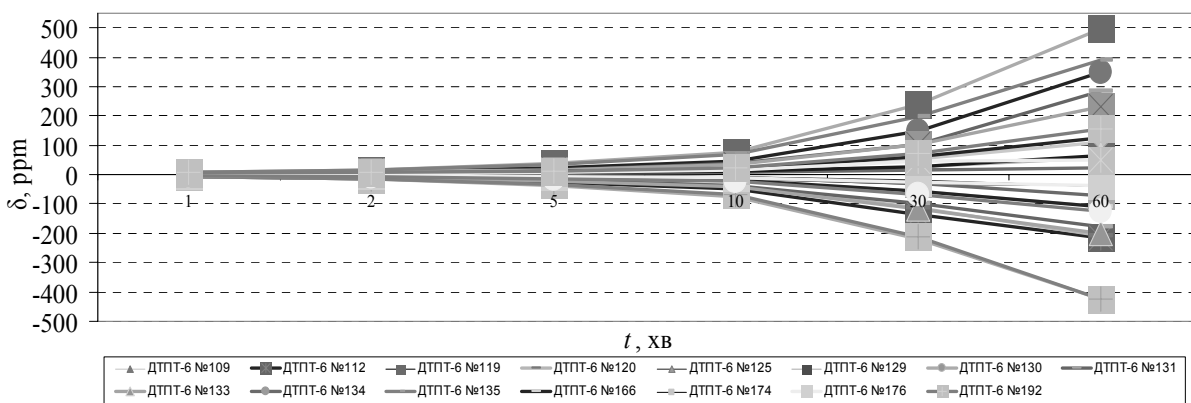


Рис. 12. Графік залежності усереднених відхилень коефіцієнтів перетворення від часу спостереження для ДТПТ-6 (5 В, 1-й нагрівач).

2. Військовий вторинний еталон одиниці електричної напруги від 0.1 до 1000 В змінного струму в діапазоні частот від 10 Гц до 30 МГц

За допомогою створеного військового вторинного еталона одиниці електричної напруги від 0.1 до 1000 В змінного струму в діапазоні частот від 10 Гц до 30 МГц (ВЕ) здійснюється атестація, перевірка й калібрування робочих еталонів першого розряду перетворювачів напруги термоелектричних, установок перевірочних, калібраторів прецизійних, селективних універсальних,

комбінованих вольтметрів, генераторів сигналів низькочастотних і високочастотних.

ВЕ є самодостатньою автоматизованою системою, яка не вимагає калібрування від інших еталонів напруги змінного струму, складається з комплексу апаратури об'єднаної інтерфейсом реального часу: прецизійних джерел постійної й змінної напруги, надчутливих високоточних вимірників постійної напруги, аналізатора спектра, обладнання автоматичної реєстрації й обробки результатів вимірів і ін.

Склад апаратури й загальний вигляд еталона показано на рис. 13.

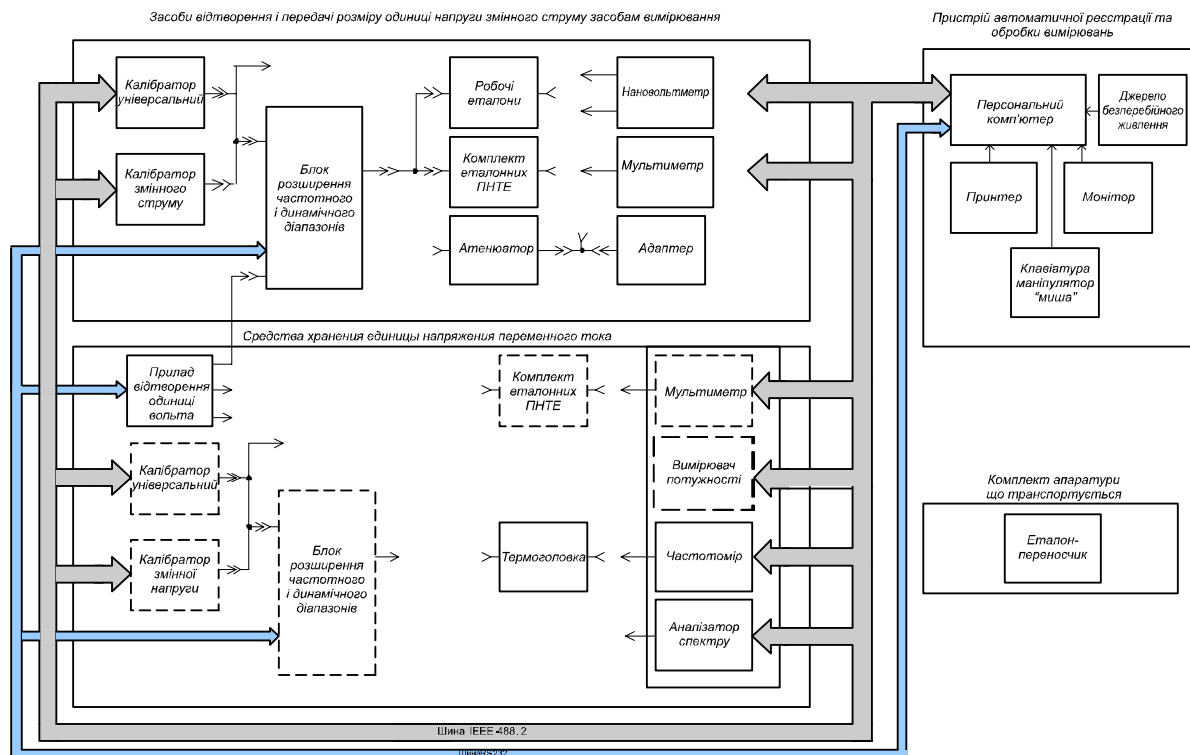


Рис. 13. Склад комплексу апаратури еталона одиниці електричної напруги змінного струму, розробленого в НІІ АЕІ НТУУ "КПІ". Структурна схема.

У комплект апаратури ввійшли розроблені в НІІ АЕІ НТУУ "КПІ" такі унікальні засоби вимірювальної техніки (ЗВТ), як:

- 1) блок розширення частотного й динамічного діапазону (БРЧДД), що складається із трьох підсилювачів:
 - БРЧДД1 – діапазон частот до 30 МГц, діапазон скз напруги до 30 В, швидкість наростання сигналу 10000 В/мсек;
 - БРЧДД2 – діапазон частот до 1 МГц, діапазон скз напруги до 100 В, швидкість наростання сигналу 1000 В/мсек;
 - БРЧДД3 – діапазон частот до 100 кГц, діапазон скз напруги до 1000 В, швидкість наростання сигналу 1000 В/мсек;
- 2) блок вимірювальний для визначення похибки ас-дс, що генерує напруга на частоті 1 кГц із нелінійними викривленнями менше 3 ppm;
- 3) комплект еталонних перетворювачів напруги термоелектричних (ЕПНТЕ) з номінальними межами напруг 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 32 В (рис. 14, 15);
- 4) комплект переносних перетворювачів напруги термоелектричних (ППНТЕ) з номінальними межами напруг 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 32 В (мал. 14, 16).



Рис. 14. Зовнішній вигляд комплекту еталонних (ліворуч) і переносних (праворуч) перетворювачів напруги термоелектричних, розробленого в НІІ АЕІ НТУУ “КПІ”.

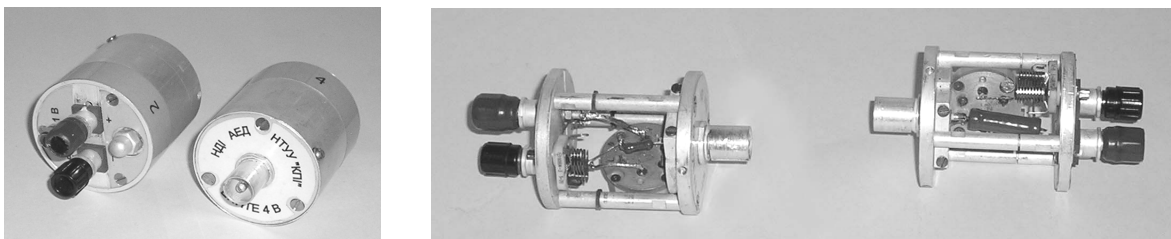


Рис. 15. Загальний вигляд окремих ЕПНТЕ й вигляд окремих ЕПНТЕ без корпусу.



Рис. 16. Загальний вигляд окремих ППНТЕ й вигляд окремих ППНТЕ без корпусу.

При цьому розроблені методики, алгоритми й програмні забезпечення для:

- розв'язку завдання цифрової стабілізації вихідних сигналів калібраторів і підсилювачів із застосуванням ітераційних алгоритмів, що мінімізує час установки заданого рівня й знижує вимоги до джерел сигналів;
- визначення похибки різнополярності;
- визначення максимального відхилення із заданою ймовірністю параметрів обладнань (термоперетворювачів, підсилювачів, калібраторів і т.д.) від математичного середнього залежно від часу спостереження;
- визначення різниці частотних характеристик еталонних й повіряємих ПНТЕ;
- визначення похибки переходу з напруги постійного струму на напругу змінного струму повіряємих ПНТЕ стосовно еталонних;
- самокалібрування ЕПНТЕ без звернення з державним еталоном.

Висновки

1. Сукупність алгоритмічних і схематичних розв'язків дала можливість підвищити точність і широкополосність ПНТЕ, використовуючи серійні ТВБ.
2. За результатами досліджень відсоток виходу для термопар ТВБ-3 – відносно високий; ТВБ-4 – низький, ДТПТ-6 – високий.

3. За результатами досліджень до складу еталонних перетворювачів напруги термоелектричних увійшли такі диференціальні термоперетворювачі ДТПТ-6: ЕПНТЕ Е0.5 – ДТПТ-6 №131-1; ЕПНТЕ Е1 – ДТПТ-6 №174-1; ЕПНТЕ Е2 – ДТПТ-6 №134-2; ЕПНТЕ Е2-1 – ДТПТ-6 №125-2; ЕПНТЕ Е4 – ДТПТ-6 №176-1; ЕПНТЕ Е8 – ДТПТ-6 №192-2; ЕПНТЕ Е16 – ДТПТ-6 №133-2; ЕПНТЕ Е32 В – ДТПТ-6 №129-2.
4. За результатами досліджень до складу переносних перетворювачів напруги термоелектричних увійшли такі вакуумні однотермопарні перетворювачі типу ТВБ-3: ППНТЕ П0.5 – ТВБ-3 №2; ППНТЕ П1 – ТВБ-3 №39, ППНТЕ П2 – ТВБ-3 №162, ППНТЕ П2-1 – ТВБ-3 №3, ППНТЕ П4 – ТВБ-3 №46, ППНТЕ П8 – ТВБ-3 №67, ППНТЕ П16 – ТВБ-3 №27, ППНТЕ П32 – ТВБ-3 №В 24-2.
5. Комбінація індивідуального добору, конструкторсько-технологічних і структурних методів підвищення точності дозволила створити Військовий вторинний еталон одиниці електричної напруги від 0.1 до 1000 В змінного струму в діапазоні частот від 10 Гц до 30 МГц ВВЕТУ 08-07-01-09.

Література

1. ДСТУ 2681-94 Метрологія. 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 весты, 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 України, 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. Чермохин // 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.

Надійшла до редакції 21.08.2012.