

УДК 621.3172

Ю.М. Туз, М.В. Добролюбова, А.А. Ульянова

Національний технічний університет України «КПІ», Київ

## ОПТИМІЗАЦІЯ ЧАСУ ТЕРМОКОМПАРУВАННЯ

Представлені матеріали щодо визначення деяких похибок еталону одиниці електричної напруги від 0,001 до 1000 В змінного струму в діапазоні частот від 10 Гц до 30 МГц, розробленого в НДІ АЕД НТУУ «КПІ»; надано методику отримання розширеної невизначеності.

**Ключові слова:** еталон, похибки первинних еталонів, похибки вторинних еталонів, часовий графік термокомпарування, похибка, зумовлена різночасовим зрівнянням при термокомпаруванні, розширена невизначеність.

## Вступ

**Постановка проблеми.** Кожна країна, яка підтримує сучасний технічний рівень або йде курсом визнання міжнародною технічною спільнотою повинна мати розвинену національну еталонну базу, яка є основою системи забезпечення єдності вимірювань. Саме цей фактор говорить про темпи науково-технічного прогресу країни. Створення, розширення та підтримки еталонної бази на необхідному технічному рівні потребує регулярних досліджень та звірення з еталонами інших країн з метою міжнародного визнання результатів вимірювань та випробувань.

Національна еталонна база України досить розвинена, але науково-технічний прогрес не стоїть на місці і потребує докладання чималих зусиль з боку наукових співробітників для її вдосконалення.

Автори статті мають за мету надати матеріали деяких досліджень стосовно розробленого за їх участю вторинного еталону одиниці електричної напруги від 0,1 В до 1000 В змінного струму у діапазоні частот від 10 Гц до 30 МГц (ЕОНЗС) [1 – 3].

Середньоквадратичне значення (СКЗ) змінної напруги заданого розміру не може бути відтворене за допомогою існуючого фізичного явища. Тому ЕОНЗС належать до одних з найбільш складних еталонів. Однак існує визначення СКЗ періодичної напруги – корінь квадратний з усередненого за період визначеного інтегралу квадрату миттєвих значень напруги [4]

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

де  $T$  – період напруги,  $U(t)$  – побіжне значення напруги.

В зв'язку з цим є декілька підходів щодо визначення СКЗ напруги.

Найбільше поширення в світі отримав спосіб порівняння теплових ефектів  $U_{\text{СКЗ}}$  постійної і змінної напруг на одному й тому ж термоелектричному перетворювачі – термокомпарування. Цей спосіб використовується в національних еталонах більшості країн, в тому числі і в Україні.

**Постановка завдання.** Похибка первинних еталонів характеризується [5, 6]:

- невиключеною систематичною похибкою відтворення одиниці напруги  $\Theta$ ;
- випадковою похибкою у вигляді середньоквадратичного відхилення (СКВ) результатів вимірювань  $S$ ;
- похибкою передавання розміру одиниці ФВ від еталона до зразкових засобів вимірювання  $S_{\Sigma}$ ;
- нестабільністю  $v$ .

Оскільки ВЕ є вторинним еталоном, то на основі метрологічних характеристик, отриманих як для первинного еталона, необхідно при обробці результатів вимірювань визначити сумарну похибку еталона, яка характеризується середньоквадратичним відхиленням результату вимірювань ( $S_{\Sigma}$ ) при його зрівненні з первинним еталоном.

При врахуванні невилученої систематичної похибки  $S_{\Sigma}$  виражається через СКВ суми невилучених систематичних і випадкових похибок еталона за формулою (7) з (ГОСТ 8.381-80).

Окрім цього повинна бути визначена систематична похибка  $\gamma$ , яка може бути вилучена в залежності від діапазону напруг і частот. Систематична похибка  $\gamma$  не є нормованою характеристикою ета-

лону. Систематична похибка  $\gamma$  використовується як довідковий матеріал при необхідності для внесення поправок при відтворенні одиниці напруги та при повірці засобів вимірювальної техніки. Систематична похибка  $\gamma$  складається з систематичної похибки переходу зі змінної напруги на постійну на частоті калібрування та частотної похибки.

Для того, щоб переконатись в правильності функціонування складових частин еталону та для безпосереднього визначення складових похибок, які дозволять розраховувати похибки еталону, передбачені вимогами ГОСТ 8.381-80 необхідно виконати наступні операції:

- атестація (повірка) приладів, що входять до складу розробленого еталону;
- визначення коефіцієнта перетворення кожного еталонного перетворювача напруги термоелектричного (ЕПНТЕ) та ПНТЭ-12/2 в середині динамічного діапазону;
- визначення вхідного опору кожного ЕПНТЕ та ПНТЭ-12/2;
- визначення похибки різнополярності (асиметрії);
- визначення короткочасової нестабільності кожного ЕПНТЕ та термоголовки комплексу ПНТЭ-12/2;
- визначення похибки переходу з напруги змінного струму на напругу постійного струму  $\delta_{acdc}$  перетворювачів ЕПНТЕ 1В, ЕПНТЕ 2В на частоті калібрування 1 кГц;
- визначення шляхом термокомпарування похибок переходу зі змінної напруги на постійну ЕПНТЕ та ПНТЭ-12/2 з суміжними значеннями номінальних напруг на частоті калібрування 1 кГц;
- визначення частотної похибки опорного ЕПНТЕ розрахунковим методом;
- експериментальна оцінка частотної похибки опорного ЕПНТЕ;
- визначення частотних похибок ЕПНТЕ та ПНТЭ-12/2 з суміжними значеннями номінальних напруг;
- визначення інструментальної складової невилученої систематичної похибки автоматизованої системи ВЕ при вимірюваннях для визначення

різниць похибок переходу зі змінної напруги до постійної шляхом термокомпарування;

- визначення інструментальної складової невилученої систематичної похибки автоматизованої системи розробленого еталону при вимірюваннях для визначення різниці частотних похибок;
- визначення систематичної  $\gamma_{13}$  та випадкової  $S_{13}$  похибок ППНТЕ та ПНТЭ-12;
- визначення невилученої систематичної похибки (НСП)  $\Theta$  еталона;
- визначення випадкової похибки  $S$  еталона;
- визначення нестабільності еталона  $v$ ;
- визначення похибки передавання розміру одиниці  $S\varepsilon_{\Sigma}$  еталона;
- визначення сумарної похибки еталона  $S_{\Sigma}$ ;
- перевірка діапазону частот та напруг, в якому забезпечується відтворення та передавання одиниці напруги змінного струму;
- визначення систематичної похибки  $\gamma$ .

Серед вищезначеної великої кількості операцій в даній статті автори акцентують увагу на похибці, зумовленої різночасовим зрівнянням та на похибках різнополярності і короткочасової нестабільності.

### Основний зміст досліджень

Часовий графік термокомпарування складається з часу підключення до термокомпаратора змінної напруги, приблизно рівної їй постійної напруги однієї полярності, рівної їй постійної напруги протилежної полярності. Величина і полярність напруги постійного струму на виході ідеального еталона залишається постійною на протязі усього часу відтворення значення, що потребується. На відміну від того, напруга змінного струму змінює свою полярність і її значення зазвичай не залишається постійним між змінами полярності (рис. 1).

Загалом в залежності від сталої часу термокомпаратора процес компарування триває від декількох десятків секунд до декількох хвилин. За цей час значення напруг постійного та змінного струмів повинні залишатись в межах заданих похибок. Стосовно еталонів змінного струму це становить одиниці ppm.

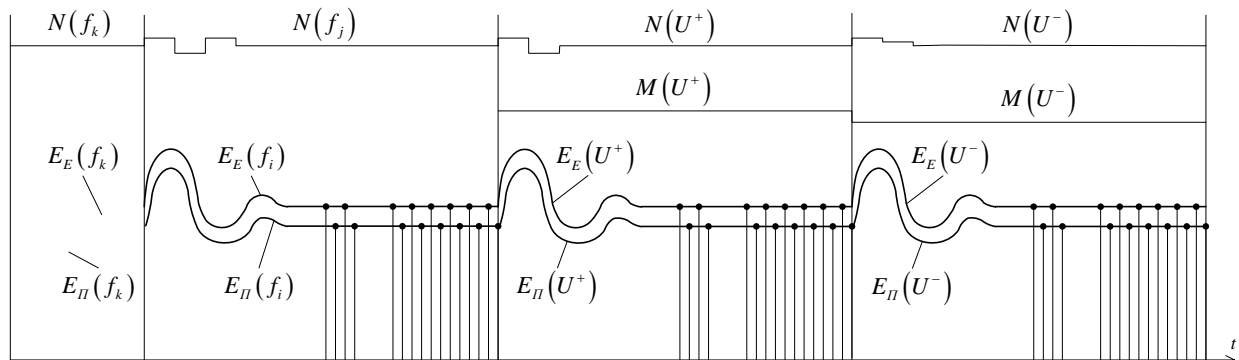


Рис. 1. Часова діаграма роботи

Середнє значення електрорушійної сили термоперетворювача при підключенні до ПНТЕ позитивної напруги  $U^+$  визначається за формулою:

$$\bar{E}^+ = 0.2 \sum_{15}^{19} E_i^+ . \quad (2)$$

Середнє значення електрорушійної сили термоперетворювача при підключенні до ПНТЕ негативної напруги  $U^-$  визначається за формулою:

$$\bar{E}^- = 0.2 \sum_{15}^{19} E_i^- . \quad (3)$$

Середнє значення електрорушійної сили термоперетворювача при підключенні до ПНТЕ змінної напруги значенням  $U^{\sim}$  визначається за формулою:

$$\bar{E}^{\sim}(f_i) = 0.2 \sum_{15}^{19} E^{\sim}(f_i)_i . \quad (4)$$

**Похибка, зумовлена різночасовим зрівнянням при термокомпаруванні.** Як було вже зазначено вище при термокомпаруванні передбачається по чергове підключення до ЕПНТЕ змінної напруги, позитивної постійної напруги, негативної постійної напруги.

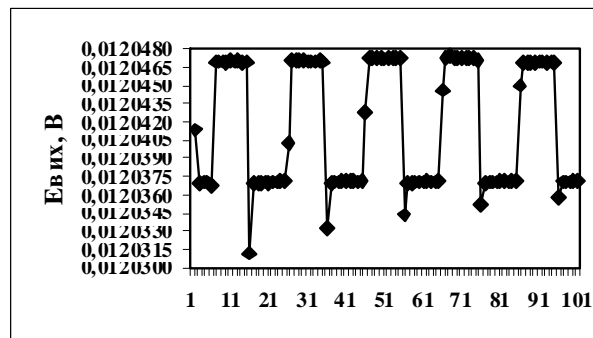
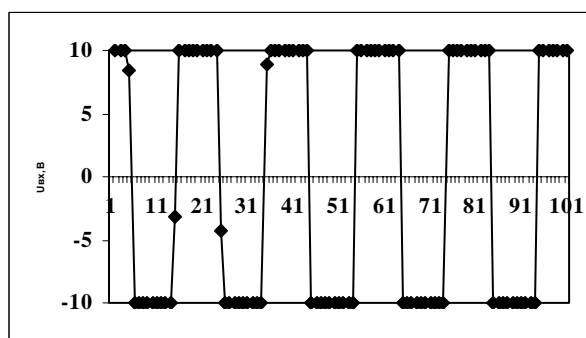


Рис. 2. Типовий графік результатів вимірювання вхідної напруги і вихідної термоЕРС процесу визначення похибки різнополярності

При нульових початкових умовах термоЕРС наростає за законом

$$E(t) = E(\infty) \left[ 1 - e^{-t/\tau} \right], \quad (5)$$

Де  $E(\infty)$  – значення термоЕРС, що установилась на нескінченному інтервалі часу

$$E(\infty) = kU^2 \quad (6)$$

$\tau$  – теплова стала термоперетворювача, яка лежить в межах 3÷5 сек. Якщо вхідна напруга стрибкоподібно змінюється на  $\Delta U$ , то відповідний приріст термоЕРС буде

$$\Delta E(t) = \Delta E(\infty) \left[ 1 - e^{-t/\tau} \right]. \quad (7)$$

Відносний приріст термоЕРС за час  $t$  буде

$$\frac{\Delta E(t_1)}{E(\infty)} = \frac{\Delta E(\infty)}{E(\infty)} \left[ 1 - e^{-t_1/\tau} \right]. \quad (8)$$

Відносна похибка від стрибкоподібної зміни термоЕРС буде

$$\gamma = \frac{\Delta E(t_1) - \Delta E(\infty)}{E(\infty) + \Delta E(\infty)} = \frac{\Delta E(\infty) (1 - e^{-t_1/\tau}) - \Delta E(\infty)}{E(\infty) + \Delta E(\infty)} = \quad (9)$$

$$= \frac{-\Delta E(\infty) \cdot e^{-t_1/\tau}}{E(\infty) + \Delta E(\infty)} = - \frac{e^{-t_1/\tau}}{E(\infty)/\Delta E(\infty) + 1},$$

якщо  $\frac{E(\infty)}{\Delta E(\infty)} \gg 1,$  (10)

то  $\gamma = - \frac{\Delta E(\infty)}{E(\infty)} \cdot e^{-t_1/\tau}.$  (11)

З останньої формули можна визначити необхідний час для встановлення ТЕРС після комутації

$$t_1 = \tau \cdot \ln \left| -\gamma \cdot \frac{E(\infty)}{\Delta E(\infty)} \right|. \quad (12)$$

Якщо  $\gamma = 10^{-6}$ ,  $\frac{E(\infty)}{\Delta E(\infty)} = 1000$ ,  $\tau = 3 \div 5$  с, то

$$t_1 = \tau \cdot 6,9 \approx 7\tau = 21 \div 35 \text{ с.}$$

Якщо  $\gamma = 5 \cdot 10^{-6}$ ,  $\frac{E(\infty)}{\Delta E(\infty)} = 1000$ ,  $\tau = 3 \div 5$  с, то

$$t_1 = \tau \cdot 5,29 \approx 5\tau = 15 \div 25 \text{ с.}$$

Виходячи з цього, при реалізації алгоритму вимірювань час підключення однієї з напруг становить 30 сек. при тривалості однієї пари вимірювань 3 сек. Останні 4 вимірювання перед комутацією осереднюються і використовуються для підрахунків. Після цього проводиться осереднення п'яти циклів вимірювань. Це подвійне осереднення значень береться для розрахунків.

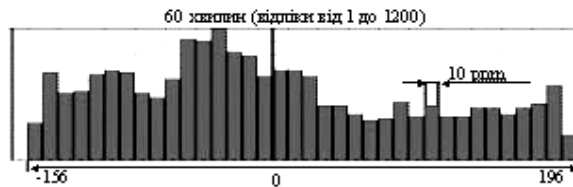
**Методика отримання розширеної невизначеності.** Якщо час установлення вхідного сигналу занадто великий похибка зростає через нестабільність джерел сигналів, ЕПНТЕ і вимірювальних приладів.

Тому автори поставили за мету зробити оцінку оптимального часового інтервалу між тактами компарування та розробили методику отримання розширеної невизначеності [7-10]. Розроблена методика складається з наступних кроків:

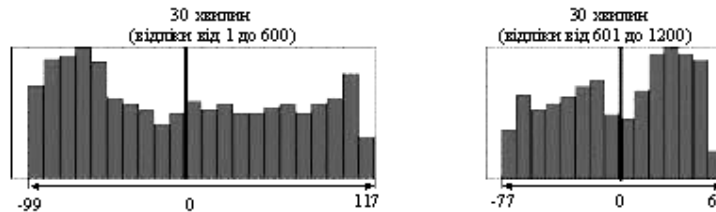
1. Побудова гістограми нестабільності відхилень від середнього значення для довільного компоненту комплекту апаратури для відтворення одиниці напруги змінного струму на 60-хвилинному поточному інтервалі часу (рис. 3).

2. Побудова гістограм розподілу відхилень від середнього значення для довільного компоненту комплекту апаратури для відтворення одиниці напруги змінного струму на двох 30-хвилинних, шести 10-хвилинних, дванадцяти 5-хвилинних, тридцяти 2-хвилинних та шестидесяти 1-хвилинних поточних інтервалах часу на протязі години (рис. 3).

**Гістограма розподілу відхилень від середнього значення на 60-ти хвилинному інтервалі**

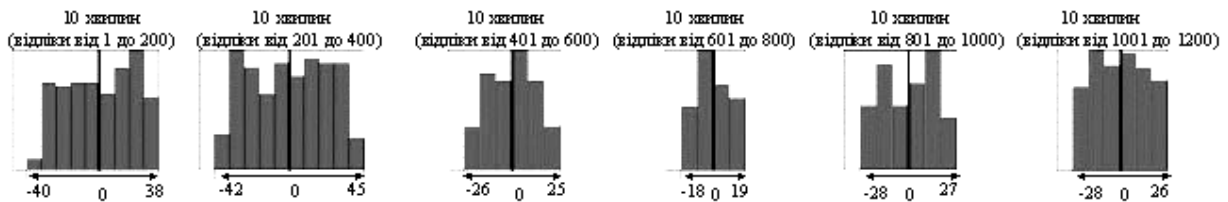


**Дві гістограми розподілу відхилень від середнього значення на 30-ти хвилинних інтервалах**



Осереднене відхилення з вірогідністю 0,95 за двома гістограмками знаходиться в діапазоні від -88 ppm до +90,5 ppm

**Шість гістограм розподілу відхилень від середнього значення на 10-ти хвилинних інтервалах**



Осереднене відхилення з вірогідністю 0,95 за шістьма гістограмками знаходиться в діапазоні від -30,3 ppm до +30 ppm

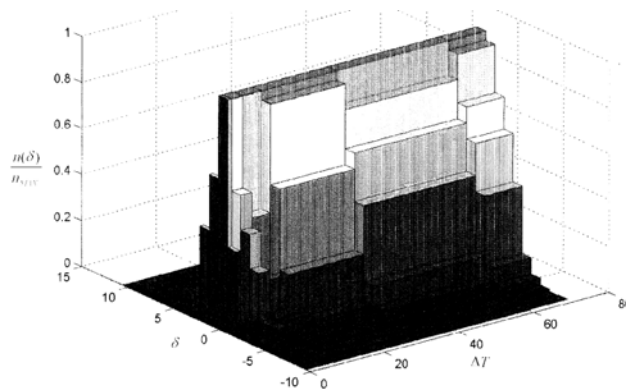


Рис. 3. Побудова гістограм нестабільності відхилень від середнього значення для довільного компоненту комплекту апаратури для відтворення одиниці напруги змінного струму

3. Знаходження діапазону відхилень, який відповідає вірогідності 0,95, на 60-хвилинному та кожному 30, 10, 5, 2, 1-хвилинному поточному інтервалі часу.

4. Знаходження осередненого діапазону відхилень, який відповідає вірогідності 0,95 за двома 30-хвилинними, шістьма 10-хвилинними, дванадцятьма 5-хвилинними, тридцятьма 2-хвилинними та шістьдесятьма 1-хвилинними гістограмами (табл. 1).

Таблиця 1  
Осереднені діапазони відхилень

Результати			
Хвилини	Відхилення з вірогідністю 0,95		
	-	+	середнє
1	-2,81	2,3	2,56
2	-4,62	3,52	4,07
5	-6,92	4,95	5,94
10	-12,2	8,76	10,48
30	-29,41	12,84	21,13
60	-47,38	33,71	40,55

5. Побудова графіку залежності усереднених відхилень від часу спостереження з вірогідністю 0,95 (рис. 4).

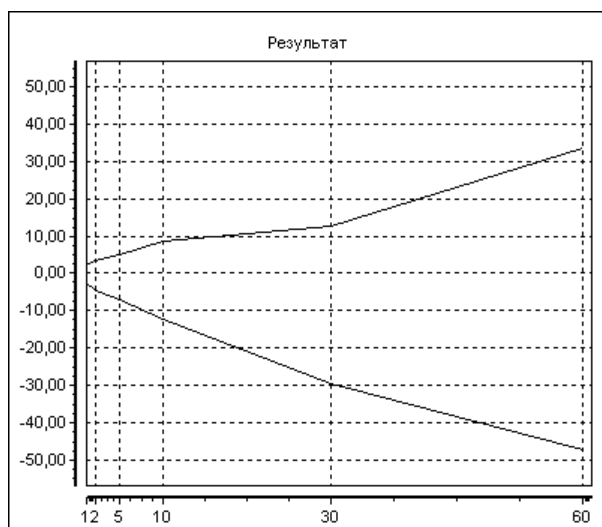


Рис. 4. Графік залежності усереднених відхилень від часу спостереження з вірогідністю 0,95

## Висновки

Перемикання калібраторів з одного режиму на інший, або релейних комутаторів не є миттєвим, необхідно правильно визначити тривалість підключення до ЕПНТЕ напруг, початок інтегрування з метою запобігання похибок від перехідних процесів.

Перехідні процеси зумовлені розривами вхідних сигналів при комутації, також деякою нерівністю напруг, що почергово підключаються до ПНТЕ.

Аналіз залежності усереднених відхилень вихідних сигналів від часу спостереження показав, що інтервал між тактами компарування не повинен перевищувати двох хвилин.

Часовий графік системи складено з урахуванням нестабільності джерел сигналів, ЕПНТЕ та вимірювальних приладів.

При реалізації алгоритму вимірювань час підключення однієї з напруг становить 30 сек. при тривалості однієї пари вимірювань 3 сек. Останні 4 вимірювання перед комутацією осереднюються і використовуються для підрахунків. Після цього проводиться осереднення п'яти циклів вимірювань. Це подвійне осереднення значень береться для розрахунків.

## Список літератури

1. Туз Ю.М. Створення комплексу апаратури військового еталону одиниці електричної напруги змінного струму. Матеріали проведення Центрального збору з командирами та головними інженерами регіональних метрологічних військових частин, лабораторій виміральної техніки видів Збройних Сил України, начальниками служб метрології та стандартизації видів Збройних Сил України, повітряних командувань, старшими інженерами-метрологами штабів логістик армійських корпусів на базі Метрологічного центру військових еталонів Збройних Сил України / Ю.М. Туз. – Х., 21-22 травня 2008. – С. 49-53.

2. Туз Ю.М. Еталонні перетворювачі змінної напруги / Ю.М. Туз, О.В. Рахмаїлов, М.В. Добролюбова // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2008. – № 2 – С. 74-80.

3. Tuz Yu.M. 0.1 V to 1000 V AC Voltage standard in the frequency range of 10 Hz to 30 MHz / Yu.M. Tuz, J.V. Rakhmailov, M.V. Dobrolyubova, B.P. Khimichenko // Proc. International conf. on precision electromagnetic measurements "СРЕМ-2010". Seoul, Korea, 2010.

4. Туз Ю.М. Основные проблемы точного измерения напряжения переменного тока / Ю.М. Туз, В.В. Литвіх, М.В. Добролюбова та інші. // VI Міжнародна науково-технічна конференція "Метрологія та вимірвальна техніка": Наукові праці. Т. 1. – Х.: ХФ ДП "УкрНДНЦ", - 14-16 жовтня, 2008. С. 9-15

5. ГОСТ 8.381-80. Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны. Способы выражения погрешностей.

6. Туз Ю.М. Похибки та невизначеність еталону одиниці електричної напруги від 0,001 до 1000 В змінного струму в діапазоні частот від 10 Гц до 30 МГц / Ю.М. Туз, М.В. Добролюбова, Ю.В. Артюхова // Системи обробки інформації. Збірник наукових праць. – Вип. 5(79). – Х.: ХУПС, 2009. – С. 112-114.

7. Туз Ю.М. Дослідження стабільності деяких прецизійних джерел напруги / Ю.М. Туз, М.В. Добролюбова // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – К. НТУУ "КПІ", 2003. – № 5. – С. 99-104.

8. Schrüfer E. Signalverarbeitung numerische Verarbeitung digitaler Signale / E. Schrüfer. – München. Wien: Hanser, 1990. – 320 s.

9. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника / В.И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.

10. Керівництво з вираження невизначеності у вимірюваннях / Пер. з англ. М.В. Москаленко. – Х.: ХДНДІМ, 2002. – 128 с.

Надійшла до редколегії 30.03.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.П. Захаров, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

#### ОПТИМИЗАЦИЯ ВРЕМЕНИ ТЕРМОКОМПАРИРОВАНИЯ

Ю.М. Туз, М.В. Добролюбова, А.А. Ульянова

*Представлены материалы для определения некоторых погрешностей эталона единицы электрического напряжения от 0,001 до 1000 В переменного тока в диапазоне частот от 10 Гц до 30 МГц, разработанного в НИИ АЭИ НТУУ "КПИ"; приведена методика получения расширенной неопределенности.*

**Ключевые слова:** эталон, погрешности первичных эталонов, погрешности вторичных эталонов, временной график термокомпарирования, погрешность, обусловленная одновременным сравнением при термокомпарировании, расширенная неопределенность

#### OPTIMIZATION OF TIME THERMAL COMPARISON

Y.M. Tuz, M.V. Dobrolyubova, A.A. Uliyanova

*Materials for the definition of several errors of the 0.001 V to 1000 V AC voltage standard in the frequency range of 10 Hz to 30 MHz developed at the scientific research institute AEI NTUU "KPI" are presented. The technique of expanded uncertainty definition is given.*

**Keywords:** measurement standard, errors of primary standards, errors of secondary measurement standards, time schedule for thermal comparison, error caused by diversity at thermal comparison, the expanded uncertainty.