

УДК 389.317

В.В. Літвіх, А.О. Назаренко

Національний технічний університет України «КПІ», Київ, Україна

НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ РІЗНИЦІ ПЕРЕХОДУ З ПОСТІЙНОГО НА ЗМІННИЙ СТРУМ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НАПРУГИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ

Проведено аналіз рівнянь вимірювання різниці переходу з постійного на змінний струм перетворювачів напруги термоелектричних (ПНТЕ). Проаналізовано методичну похибку, яка виникає при застосуванні деяких рівнянь вимірювання різниці переходу з постійного на змінний струм ПНТЕ. Запропоновано та проаналізовано нове рівняння вимірювання. Доведено, що при його використанні інструментальна компонента невизначеності за типом В вимірювання різниці переходу з постійного на змінний струм ПНТЕ не перевищує 0,026 ррт.

Ключові слова: невизначеність вимірювання, рівняння вимірювання, перетворювач напруги термоелектричний, різниця переходу з постійного на змінний струм.

Вступ

Постановка проблеми. Принцип дії більшості еталонів одиниці електричної напруги змінного струму (як первинних, так і робочих) базується на

передаванні її розміру з постійної на змінну напругу. Зазвичай це здійснюється шляхом вимірювання середньої потужності, яка виділяється в ідеальному резисторі напругою змінного струму (НЗС) та порівняння її з потужністю, яка виділяється на тому ж

резисторі напругою постійного струму (НПС). Технічні засоби, які для цього використовуються, а також методика проведення вимірювань, призводять до виникнення певних складових невизначеності результату вимірювання.

Метою статті є розв'язання певних проблем, які пов'язані зі зменшенням невизначеності, що виникає при відтворенні та передаванні розміру одиниці електричної напруги змінного струму.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для вимірювання середньої потужності, яка виділяється на ідеальному резисторі НЗС та порівняння її з потужністю, яка виділяється на тому ж резисторі НПС зазвичай використовуються перетворювачі напруги термоелектричні (ПНТЕ) [1 – 3]. Ці засоби вимірювальної техніки являють собою послідовне з'єднання резистора та нагрівача термоелектричного перетворювача.

ПНТЕ широко використовуються як у складі еталонів одиниці електричної напруги змінного струму, так і для передавання її розміру від еталону до інших засобів вимірювальної техніки відповідно до повірочної схеми.

Термоелектричні ефекти Пельтьє та Томсона, а також певні конструктивні особливості призводять до того, що при передаванні одиниці електричної напруги з постійної на змінну напругу виникає специфічна похибка [4 – 6]. В міжнародній практиці та в більшості англомовних країн для її позначення використовується термін «*ac-dc transfer difference*» – «різниця переходу з постійного на змінний струм» (далі – РППЗС). Ідеальне значення РППЗС визначають за формулою:

$$\delta_{I,acdc} = \frac{V_{ac} - V_{dc}}{V_{dc}} \bigg|_{V_{dc}^+ = |V_{dc}^-|}, \quad (1)$$

де V_{dc} – значення напруги постійного струму (НПС) V_{dc} , яка при ідеальному її реверсуванні на вході ПНТЕ (тобто при виконанні умови $V_{dc}^+ = |V_{dc}^-| = V_{dc}$) викликає на його виході термоЕРС E_{dc} із значеннями e_{dc}^+ (при позитивній полярності вхідної НПС) та e_{dc}^- (при негативній полярності вхідної НПС); V_{ac} – середньоквадратичне значення напруги змінного струму (НЗС) V_{ac} на вході ПНТЕ, яка викликає на його виході термоЕРС E_{ac} із значенням e_{ac} , причому

$$e_{ac} = \bar{e}_{dc}, \quad (2)$$

де $\bar{e}_{dc} = (e_{dc}^+ + e_{dc}^-) / 2$ – середньо арифметичне значення термоЕРС E_{dc} на виході ПНТЕ.

Надалі, задля спрощення, індекс «acdc» в позначенні РППЗС – δ_{acdc} використовуватися не буде.

Національні еталони одиниці електричної напруги змінного струму в діапазоні частот до 1 МГц більшості розвинутих країн використовують ПНТЕ на основі багатоеlementних термоперетворювачів [7 – 10]. В таких термоперетворювачах завдяки певним конструктивним рішенням суттєво зменшується вплив термоелектричних ефектів Пельтьє та Томсона. Але ці конструктивні рішення обмежують верхнє значення діапазону частот, яке, як правило, не перевищує 1 МГц.

В діапазоні частот до 30 МГц і вище застосовуються ПНТЕ на основі одноelementних вакуумних безконтактних термоперетворювачів. Але в таких ПНТЕ термоелектричні ефекти Пельтьє та Томсона, а також неідеальність конструкції термоперетворювача (термопара зміщена відносно середини нагрівача) призводить до того, що РППЗС в них має суттєво більше значення [11].

Для вимірювання РППЗС ПНТЕ використовують різні методики та засоби вимірювальної техніки в залежності від типу ПНТЕ. Для ПНТЕ на основі багатоеlementних термоелектричних перетворювачів зазвичай використовують метод швидкого реверсування постійної напруги [12]. Для вимірювання РППЗС ПНТЕ на основі одноelementних вакуумних термоперетворювачів використовуються різні методики, які відрізняються як технічними засобами вимірювальної техніки, так і похибками, які вони забезпечують [13 – 19].

Формулювання мети статті. Для створення ПНТЕ, які можуть використовуватися у складі еталонів одиниці електричної напруги змінного струму на основі одноelementних вакуумних безконтактних термоперетворювачів, використовуються певні методики їх відбирання за мінімумом термоелектричних ефектів. Така процедура вимірювання РППЗС за допомогою певних засобів вимірювальної техніки супроводжується виникненням інструментальної компоненти невизначеності результату вимірювання, яка залежить як від типу цих засобів вимірювальної техніки, так і від рівняння вимірювання РППЗС (від алгоритму вимірювання) [20].

Метою статті є аналіз рівнянь вимірювання, які використовуються для отримання оцінки РППЗС, та розрахунок сумарної стандартної невизначеності за типом В.

Виклад основного матеріалу

Ідеальне реверсування НПС неможливо реалізувати. Неідеальне реверсування означає, що $V_{dc}^+ \neq |V_{dc}^-|$. Досить часто замість реверсування НПС використовують калібратор НПС, який відтворює НПС обох полярностей. Але і в цьому випадку виникає різниця $\Delta V_{dc} = (V_{dc}^+ - |V_{dc}^-|)$. На практиці за-

мість (1) використовують дещо інше рівняння вимірювання РППЗС, а саме:

$$\delta_{R1} = \frac{v_{ac} - \bar{v}_{dc}}{\bar{v}_{dc}} \Big|_{v_{dc} \neq |v_{dc}^-|}, \quad (3)$$

де $\bar{v}_{dc} = (v_{dc}^+ + |v_{dc}^-|) / 2$ – середнє арифметичне значення НПС позитивної полярності зі значенням v_{dc}^+ та НПС негативної полярності зі значенням v_{dc}^- на виході ПНТЕ (при чому $v_{dc}^+ \cong |v_{dc}^-|$), які викликають на його виході термоЕРС E_{ac} із значеннями e_{dc}^+ , e_{dc}^- відповідно.

Внаслідок того, що замість рівняння (1) використовується рівняння (2), виникає невилучена систематична похибка методу (методична похибка) Θ_M . Відповідно до [21] це складова похибки вимірювання, що зумовлена неадекватністю об'єкта вимірювання та його моделі, прийнятою при вимірюванні. Стосовно випадку, який розглядається, об'єктом вимірювання є РППЗС, значення якої розраховуються відповідно до (3), а математичною моделлю є формула (1). Причиною виникнення систематичної методичної похибки $\Theta_M = \delta_1 - \delta_{R1}$ є те, що існує різниця $\Delta v_{dc} = (v_{dc}^+ - |v_{dc}^-|)$ – похибка відтворення НПС.

Для аналізу систематичної методичної похибки припустимо, що як ПНТЕ розглядається зразковий перетворювач з параметрами, які відповідають вимогам ГОСТ 8.458-82 [22, табл. 4], а саме: номінальне значення вхідної напруги $v_N = 1$ В; номінальне значення термоЕРС $e_N = 6 \times 10^{-3}$ В. Це відповідає номінальному значенню коефіцієнта перетворення ПНТЕ $K_N = 6 \times 10^2$ В⁻¹. Задля наочності прийнято, що три різні екземпляри ПНТЕ мають такі ідеальні значення РППЗС: $\delta_1 = 25$ ppm; $\delta_2 = 0,8$ ppm; $\delta_3 = -23,3$ ppm (1 ppm $\cong 10^{-6}$).

Діапазон абсолютної похибки Δv_{dc} відтворення НПС прийнятий $\pm 10 \times 10^{-6}$ В. Це відповідає установленій для калібратора Н4-7 границі допустимої основної похибки (протягом одного року) відтворення НЗС із значенням $v = 1$ В в діапазоні відтворення з кінцевим значенням $v_K = 2$ В.

Як показали дослідження, при використанні рівняння (3) за умови (2) систематична методична похибка Θ_M не перевищує значення 0,012 ppm.

Виконання умови (2) означає, що для визначення РППЗС використовується ідеальне (нульове) компарування. На практиці виконання цієї умови

неможливо забезпечити, тобто виконується умова $e_{ac} \neq \bar{e}_{dc}$. Останнім часом в автоматизованих системах для визначення РППЗС намагаються відійти від використання нульового компарування, оскільки для цього потрібно реалізувати процедуру регулювання НЗС до виконання умови (2). Ця процедура може бути достатньо тривалою. В таких системах як джерело НЗС зазвичай використовуються калібратори змінної напруги. Але навіть за умови реалізації нульового компарування замість НЗС із значенням v_{ac} , яку потрібно установити на виході калібратора для забезпечення умови (2), буде установлено значення v'_{ac} (замість v_{ac}), що зумовлено похибкою калібратора.

Це означає що $\bar{e}_{dc} = e'_{ac} = e_{ac} + \Delta e_{ac}$, тобто

$$e'_{ac} = e_{ac} + \Delta e_{ac}; \Delta e_{ac} \ll e'_{ac}, \quad (4)$$

де термоЕРС із значенням e'_{ac} на виході ПНТЕ викликана НЗС зі значенням v'_{ac} .

В якості математичної моделі характеристики перетворення ПНТЕ (тобто залежність термоЕРС E на виході ПНТЕ від вхідної напруги V на вході ПНТЕ) досить часто використовують функцію виду $E = \varphi(V) = KV^2$, $V \in [0, v_N]$, де K – коефіцієнт перетворення, значення якого залежить від матеріалу нагрівача, конструкції термоперетворювача та умов його роботи [11]. Внаслідок перерахованих причин характеристика перетворення ПНТЕ залежить від полярності НПС – позитивної або негативної (умовно).

На рис. 1 наведено графіки характеристик перетворення ПНТЕ при НПС позитивної полярності $E = \varphi_1(V) = K_{dc}^+(V)^2$, при НПС негативної полярності $E = \varphi_2(V) = K_{dc}^-(V)^2$ та при НЗС $E = \varphi_3(V) = K_{ac}(V)^2$ в околу значень вхідних напруг $v_{dc}^+, |v_{dc}^-|, v_{ac}, v'_{ac}$, де K_{dc}^+, K_{dc}^- – коефіцієнти перетворення ПНТЕ на постійному струмі при позитивній на негативній полярності вхідної НПС відповідно; K_{ac} – коефіцієнт перетворення ПНТЕ на змінному струмі. Для наочності обидві гілки характеристики ПНТЕ – для позитивної та негативної НПС, розташовані в першому квадранті.

Якщо в (3) замість v_{ac} використовувати v'_{ac} , то замість значення РППЗС δ_{R1} буде розраховуватися значення δ'_{R1} , тобто при розрахунку значення РППЗС виникне похибка Δ_δ :

$$\delta'_{R1} = \frac{v'_{ac} - \bar{v}_{dc}}{\bar{v}_{dc}} = \delta_{R1} + \Delta_\delta, \quad (5)$$

або
$$\Delta\delta = \frac{v'_{ac}}{\bar{v}_{dc}} - 1 - \delta_{R1}. \quad (6)$$

Підставляючи (3) в (6) після перетворень отримаємо:

$$\Delta\delta = \frac{\Delta v_{ac}}{\bar{v}_{dc}}, \quad (7)$$

де $\Delta v_{ac} = v'_{ac} - v_{ac}$ – абсолютна похибка відтворення вхідної НЗС, що зумовлена невиконанням умови (2).



Рис. 1. Графіки характеристик перетворення ПНТЕ на постійному та змінному струмі

На рис. 2 наведено графіки залежності систематичних методичних похибок $\Theta_{1M} = \delta_{R1} - \delta_{I1}$, $\Theta_{2M} = \delta_{R1} - \delta_{I2}$, $\Theta_{3M} = \delta_{R1} - \delta_{I3}$ обчислення РППЗС за рівнянням (3) від абсолютної похибки відтворення НЗС $\Delta v_{ac} = v'_{ac} - v_{ac}$ для наведених вище ідеальних значень РППЗС: δ_{I1} , δ_{I2} , δ_{I3} .



Рис. 2. Залежність систематичної методичної похибки Θ_M обчислення РППЗС за рівнянням (3) від абсолютної похибки відтворення НЗС Δv_{ac}

Діапазон абсолютної похибки Δv_{ac} відтворення НЗС прийнятий $\pm 60 \times 10^{-6}$ В. Це відповідає установленій для калібратора Н4-7 границі допустимої

основної похибки (протягом одного року) відтворення НЗС із значенням $v=1$ В на діапазоні з кінцевим значенням $v_K=2$ В у діапазоні частот від 20 Гц до 20 кГц. Як видно з наведеного графіку, при використанні рівняння (3) систематична методична похибка Θ_M знаходиться в межах $\approx \pm 90$ ррр, тобто може перевищувати ідеальне значення РППЗС.

Тому виникла задача модифікувати рівняння вимірювання (3) з метою зменшення систематичної методичної похибки Θ_M .

З урахуванням того, що $v_{dc}^+ \cong |v_{dc}^-| \cong v_{ac} \cong v'_{ac}$, замість характеристик перетворення на постійному та змінному струмі можна розглядати графіки їх похідних:

$$E \cong \psi_1(V) = \frac{d\phi_1(V)}{dV} = 2K_{dc}^+ V, \quad V \in [0, v_N];$$

$$E \cong \psi_2(V) = \frac{d\phi_2(V)}{dV} = 2K_{dc}^- V, \quad V \in [0, v_N];$$

$$E \cong \psi_3(V) = \frac{d\phi_3(V)}{dV} = 2K_{ac} V, \quad V \in [0, v_N].$$

Враховуючи, що

$$\left. \frac{d\psi_3(V)}{dV} \right|_{V=v_{ac}} = 2K_{ac} V \Big|_{V=v_{ac}} \cong 2K_{ac} V \Big|_{V=v'_{ac}},$$

можна записати:

$$2K_{ac} v'_{ac} = \frac{\Delta e_{ac}}{\Delta v_{ac}}, \quad (8)$$

де $\Delta e_{ac} = e'_{ac} - e_{ac} \cong e'_{ac} - \bar{e}_{dc}$.

Звідки

$$\Delta v_{ac} \cong v'_{ac} \frac{\Delta e'_{ac}}{2e'_{ac}}. \quad (9)$$

Здійснюючи послідовні підстановки, отримаємо:

$$\delta_{R2} \cong \left[\frac{v'_{ac}}{\bar{v}_{dc}} \left(\frac{e'_{ac} + \bar{e}_{dc}}{2e'_{ac}} \right) - 1 \right]. \quad (10)$$

Враховуючи, що

$$\bar{v}_{dc} = \frac{v_{dc}^+ + |v_{dc}^-|}{2} = \frac{v_{dc}^+ - v_{dc}^-}{2},$$

$$\bar{e}_{dc} = \frac{e_{dc}^+ + e_{dc}^-}{2},$$

рівняння вимірювання (10) можна подати в наступному вигляді:

$$\delta_{R2} \cong \left(\frac{2v'_{ac}}{v_{dc}^+ - v_{dc}^-} \times \frac{2e'_{ac} + e_{dc}^+ + e_{dc}^-}{4e'_{ac}} - 1 \right). \quad (11)$$

Дослідження показали, що методична похибка $\Theta_M = \delta_{R2} - \delta_{I1}$ обчислення РППЗС за рівнянням (11) має тим більше значення, чим більше ідеальне значення РППЗС δ_{I1} , але не перевищує значення 0,004 ррр.

Рівняння (11), відповідно до якого розраховується РППЗС δ_{R2} ПНТЕ, можна розглядати як рівняння її посереднього вимірювання: результат вимірювання $\hat{\delta}_{R2}$ є функцією $f(\cdot)$ результатів вимірювання певних фізичних величин – НПС V_{dc} позитивної та негативної полярності на вході ПНТЕ, НЗС V_{ac} на вході ПНТЕ та термоЕРС $E_{dc}^+, E_{dc}^-, E'_{ac}$ на виході ПНТЕ:

$$\hat{\delta}_{R2} = f\left(v_{dc}^+, v_{dc}^-, v'_{ac}, e_{dc}^+, e_{dc}^-, e'_{ac}\right). \quad (12)$$

Як наслідок результат вимірювання РППЗС за (11) супроводжується інструментальною невизначеністю, яка виникає в зв'язку з використанням засобів вимірювання НПС, НЗС та термоЕРС [23, 24]. Таку компоненту невизначеності оцінюють за типом В GUM враховуючи специфікації на відповідні засоби вимірювання.

Для обчислення інструментальної компоненти сумарної стандартної невизначеності за типом В потрібно враховувати стандартні невизначеності вимірювань за допомогою перерахованих вище засобів вимірювання з урахуванням відповідних коефіцієнтів чутливості. Враховуючи, що

$v_{dc}^+ \cong |v_{dc}^-| \cong v'_{ac}$, $e_{dc}^+ \cong e_{dc}^- \cong e'_{ac}$, можна переконатися, що коефіцієнт чутливості $\frac{\partial f}{\partial v'_{ac}} \cong 1$. Оскільки

границі невиключеної систематичної похибки сучасних засобів вимірювання НПС та термоЕРС набагато менші, ніж границі невиключеної систематичної похибки засобів вимірювання НЗС V_{ac} , то навіть без додаткового аналізу можна зробити висновок, що інструментальна компонента невизначеності за типом В при вимірюванні РППЗС відповідно до рівняння (11) визначається практично тільки стандартною невизначеністю вимірювання НЗС V_{ac} , тобто може бути досить значною.

В той же час достатньо показовим може бути аналіз інструментальної компоненти невизначеності за типом В стосовно рівняння (11), яка зумовлена засобом вимірювання НПС. Оскільки НПС V_{dc}^+, V_{dc}^- вимірюються одним і тим же засобом вимірювання на одному і тому ж діапазоні вимірювання, то їх оцінки, отримані шляхом вимірювання, є корельованими з коефіцієнтом кореляції $r(v_{dc}^+, v_{dc}^-) = 1$. Як наслідок інструментальну компоненту невизначеності за типом В, що зумовлена засобом вимірювання НПС, можна обчислити за формулою:

$$u_{B, V_{dc}}(\delta) = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial f}{\partial v_{dc}^+}\right) u_{B, V_{dc}^+}(\delta) + \left(\frac{\partial f}{\partial v_{dc}^-}\right) u_{B, V_{dc}^-}(\delta)\right]^2},$$

або

$$u_{B, V_{dc}}(\delta) = \left| \left(\frac{\partial f}{\partial v_{dc}^+}\right) u_{B, V_{dc}^+}(\delta) + \left(\frac{\partial f}{\partial v_{dc}^-}\right) u_{B, V_{dc}^-}(\delta) \right|,$$

де $u_{B, V_{dc}^+}(\delta), u_{B, V_{dc}^-}(\delta)$ – стандартна невизначеність за типом В вимірювання НПС V_{dc}^+, V_{dc}^- .

Якщо врахувати, що $u_{B, V_{dc}^+}(\delta) = u_{B, V_{dc}^-}(\delta)$, а

коефіцієнти чутливості $\left(\frac{\partial f}{\partial v_{dc}^+}\right), \left(\frac{\partial f}{\partial v_{dc}^-}\right)$ відрізня-

ються лише знаком, тобто $\left(\frac{\partial f}{\partial v_{dc}^+}\right) = -\left(\frac{\partial f}{\partial v_{dc}^-}\right)$, то

можна стверджувати, що інструментальна компонента стандартної невизначеності за типом В, що зумовлена засобом вимірювання НПС $u_{B, V_{dc}}(\delta) = 0$.

З метою зменшення інструментальної компоненти стандартної невизначеності за типом В, що зумовлена засобом вимірювання НЗС V_{ac} , було поставлено задачу певним чином модифікувати рівняння вимірювання (11). При цьому було сформульовано певні постулати.

1. Для збільшення інформації стосовно характеристики ПНТЕ доцільно визначення РППЗС проводити в двох точках, які відповідають номінальному значенню v_N вхідної напруги та значенню вхідної напруги $v_N(1 \pm 10^{-k})$, де показник ступеня k може приймати значення $k = 3, 4, 5$, тобто в двох точках, які близько розташовані одна від одної.

2. Враховуючи наведений вище аналіз стосовно інструментальної компоненти невизначеності за типом В, що зумовлена засобом вимірювання НПС, доцільно створити нове рівняння вимірювання РППЗС такого виду, щоб в ньому стосовно НЗС використовувався вираз (наприклад) $(v_{ac1} - v_{ac2})$, що забезпечить значення суми коефіцієнтів чутливості

$$\left[\left(\frac{\partial f}{\partial v_{ac1}}\right) + \left(\frac{\partial f}{\partial v_{ac2}}\right)\right] = 0.$$

Відповідно до запропонованого значення РППЗС потрібно розраховувати в двох точках, одна з яких відповідає номінальному значенню v_N вхідної напруги, тобто при значеннях вхідних напруг $v_{dc1}^+ \cong |v_{dc1}^-| \cong v'_{ac1} \cong v_N$ (внаслідок чого на виході ПНТЕ виникає термоЕРС із значеннями $e_{dc1}^+ \cong e_{dc1}^- \cong e'_{ac1}$):

$$\hat{\delta}_{R2} = \left(\frac{v'_{ac1} \cdot a_1}{v_{dc1}} - 1\right). \quad (12)$$

де
$$a_1 = \frac{2e'_{ac1} + (e_{dc1}^+ + e_{dc1}^-)}{4e'_{ac1}}; \quad (13)$$

$$\bar{v}_{dc1} = \frac{v_{dc1}^+ - v_{dc1}^-}{2}, \quad (14)$$

а друга – при значеннях вхідної напруги $v_N \times 1,001$, тобто при значеннях вхідних напруг $v_{dc2}^+ \cong |v_{dc2}^-| \cong v'_{ac2} \cong v_N \times 1,001$ (внаслідок чого на виході ПНТЕ виникає термоЕРС із значеннями $e_{dc2}^+ \cong e_{dc2}^- \cong e'_{ac2}$):

$$\hat{\delta}_{2R2} = \left(\frac{v'_{ac2} \cdot a_2}{\bar{v}_{dc2}} - 1 \right), \quad (15)$$

де
$$a_2 = \frac{2e'_{ac2} + (e_{dc2}^+ + e_{dc2}^-)}{4e'_{ac2}}; \quad (16)$$

$$\bar{v}_{dc2} = \frac{v_{dc2}^+ - v_{dc2}^-}{2}. \quad (17)$$

Як показали дослідження, різниця між значеннями $\left(\frac{v'_{ac1} \cdot a_1}{\bar{v}_{dc1}} \right)$ та $\left(\frac{v'_{ac2} \cdot a_2}{\bar{v}_{dc2}} \right)$ не перевищує 10^{-7} ppm, тобто можна вважати, що

$$\left(\frac{v'_{ac1} \cdot a_1}{\bar{v}_{dc1}} \right) = \left(\frac{v'_{ac2} \cdot a_2}{\bar{v}_{dc2}} \right). \quad (18)$$

Синтез нового рівняння вимірювання ПНПЗС здійснено шляхом, певною мірою, евристичного підходу, внаслідок чого було отримано наступне рівняння:

$$\hat{\delta}_{R3} = \left[\frac{(v'_{ac1} - v'_{ac2})}{\bar{v}_{dc1}} + \frac{v'_{ac2}}{\bar{v}_{dc1}} \right] a_1 - 1. \quad (19)$$

Враховуючи, що $\frac{v'_{ac2} a_2}{\bar{v}_{dc2}} = \hat{\delta}_{2R2} + 1$, після перетворень можна отримати:

$$\hat{\delta}_{R3} = \left[\frac{(v'_{ac1} - v'_{ac2})}{\bar{v}_{dc1}} + (\hat{\delta}_{R3} + 1) \frac{\bar{v}_{dc2}}{\bar{v}_{dc1} a_2} \right] a_1 - 1. \quad (20)$$

Розв'язуючи (20) відносно $\hat{\delta}_{R3}$, отримаємо нове рівняння вимірювання РППЗС:

$$\hat{\delta}_{R3} = \frac{(v'_{ac2} - v'_{ac1})}{\left(\frac{\bar{v}_{dc2}}{a_2} - \frac{\bar{v}_{dc1}}{a_1} \right)} - 1, \quad (21)$$

або
$$\hat{\delta}_{R3} = \frac{(v'_{ac2} - v'_{ac1})}{\left(\frac{v_{dc2}^+ - v_{dc2}^-}{2a_2} - \frac{v_{dc1}^+ - v_{dc1}^-}{2a_1} \right)} - 1, \quad (22)$$

де коефіцієнти a_1, a_2 визначаються формулами (13), (16).

На рис. 3 наведено графіки залежності систематичних методичних похибок $\Theta_{1M} = \delta_{R1} - \delta_{1I}$, $\Theta_{2M} = \delta_{R1} - \delta_{2I}$, $\Theta_{3M} = \delta_{R1} - \delta_{3I}$ обчислення РППЗС за рівнянням (22) від абсолютної похибки вимірювання (відтворення) НЗС $\Delta v_{ac} = v'_{ac} - v_{ac}$ для наведених вище ідеальних значень РППЗС: δ_{1I} , δ_{2I} , δ_{3I} .



Рис. 3. Залежність систематичної методичної похибки Θ_M обчислення РППЗС за рівнянням (22) від абсолютної похибки відтворення НЗС Δv_{ac}

Як видно з наведених графіків, систематична методична похибка Θ_M обчислення РППЗС за (22) знаходиться в межах приблизно $\pm 0,002$ ppm.

Відповідно до (22) НЗС V_{ac} вимірюють одним і тим же засобом вимірювання на одному і тому ж діапазоні вимірювання (або відтворюють за допомогою одного і того ж калібратора на одному і тому ж діапазоні відтворення), то їх оцінки є корельованими з коефіцієнтом кореляції $r(v'_{ac2}, v'_{ac1}) = 1$. Як наслідок інструментальну компоненту невизначеності за типом В, що зумовлена засобом вимірювання НЗС, можна обчислити за формулою:

$$u_B(\delta) = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial v'_{ac1}} \right) u_{B, v'_{ac1}}(\delta) + \left(\frac{\partial f}{\partial v'_{ac2}} \right) u_{B, v'_{ac2}}(\delta) \right],$$

де $u_B(v'_{ac1}), u_B(v'_{ac2})$ - стандартна невизначеність за типом В вимірювання (відтворення) НЗС V_{ac} .

Якщо врахувати, що $u_{B, v'_{ac1}}(\delta) = u_{B, v'_{ac2}}(\delta)$, а коефіцієнти чутливості $\left(\frac{\partial f}{\partial v'_{ac1}} \right), \left(\frac{\partial f}{\partial v'_{ac2}} \right)$ відрізняються лише знаком, тобто $\left(\frac{\partial f}{\partial v'_{ac1}} \right) = - \left(\frac{\partial f}{\partial v'_{ac2}} \right)$, то можна стверджувати, що інструментальна компонента невизначеності за типом В оцінки НЗС $u_B(V_{ac}) = 0$, що було поставлено як цільову функцію при розробці нового рівняння вимірювання (22).

Аналогічний висновок можна зробити стосовно інструментальної компоненти невизначеності за ти-

пом В рівняння (22), яка зумовлена засобом вимірювання (або відтворення) НПС: оскільки коефіцієнти чутливості $\left(\frac{\partial f}{\partial v_{dc1}^+}\right), \left(\frac{\partial f}{\partial v_{dc2}^-}\right)$ також відрізняються

лише знаком, тобто $\left(\frac{\partial f}{\partial v_{dc1}^+}\right) = -\left(\frac{\partial f}{\partial v_{dc2}^-}\right)$, то інстру-

ментальна компонента невизначеності за типом В оцінки НПС $v_{dc1} - u_{B,v_{dc1}}(\delta) = 0$. Те ж саме стосується інструментальної компоненти невизначеності за типом В, що зумовлена засобом вимірювання НПС v_{dc2} : $u_{B,v_{dc2}}(\delta) = 0$.

Дещо інший результат дає аналіз інструментальної компоненти невизначеності за типом В, яка зумовлена засобом вимірювання термоЕРС. Припустимо, що термоЕРС на виході ПНТЕ вимірюється за допомогою нановольтметра моделі 34420А фірми Hewlett Packard або Agilent. Відповідно до специфікації на ці прилади границі систематичної похибки на діапазоні вимірювання з кінцевим значенням $e_K = 10$ мВ визначаються формулою ($\pm 5 \times 10^{-5}$ від $e_X + 5 \times 10^{-6}$ від e_K) В. Враховуючи, що значення вимірюваних термоЕРС практично однакові і близькі до номінального значення $e_N = 6 \times 10^{-3}$ В, інструментальна компонента стандартної невизначеності розраховується за формулою [24]:

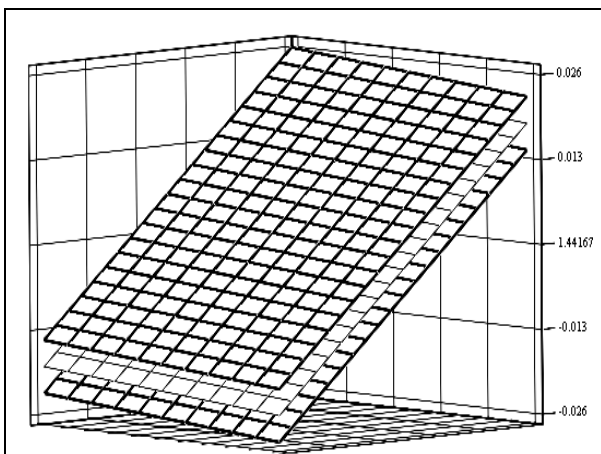
$$u_{B,E}(\delta) = \frac{30 \cdot 10^{-8} + 5 \cdot 10^{-8}}{\sqrt{3}} \cong 2 \cdot 10^{-7} \text{ В.} \quad (23)$$

З урахуванням того, що всі оцінки термоЕРС є корельованими з коефіцієнтом кореляції $r(e_j, e_i) = 1$, сумарну стандартну невизначеність за типом В розраховують за формулою

$$u_c(\delta) = \left[\sum \left(\frac{\partial f}{\partial e_i} \right) u_{B,E}(\delta) \right], \quad (24)$$

де $\left[\sum \left(\frac{\partial f}{\partial e_i} \right) \right] = \left(\frac{\partial f}{\partial e_{dc1}^+} \right) + \left(\frac{\partial f}{\partial e_{dc1}^-} \right) + \left(\frac{\partial f}{\partial e_{dc2}^+} \right) + \left(\frac{\partial f}{\partial e_{dc2}^-} \right) + \left(\frac{\partial f}{\partial e_{ac1}'} \right) + \left(\frac{\partial f}{\partial e_{ac2}'} \right)$ – алгебраїчна сума коефіцієнтів чутливості.

Враховуючи громіздкість аналітичних виразів для перерахованих вище коефіцієнтів чутливості, на рис. 4 наведені результати моделювання залежності інструментальної компоненти сумарної стандартної невизначеності за типом В, що зумовлена засобом вимірювання термоЕРС (нановольтметр моделі 34420А), за рівнянням (22) від абсолютної похибки відтворення НЗС Δv_{ac} та від абсолютної похибки відтворення НПС Δv_{dc} .



M1, M2, M3

Рис. 4. Залежність інструментальної компоненти невизначеності обчислення РППЗС за рівнянням M2, M3 (22) від абсолютної похибки відтворення НЗС Δv_{ac} та від абсолютної похибки відтворення НПС Δv_{dc}

Як видно з наведених графіків, сумарна стандартна невизначеність за типом В вимірювання РППЗС відповідно до рівняння вимірювання (22) з урахуванням (23), (24) не перевищує значення $u_c(\delta) = 0,026$ ppm.

Висновки

Внаслідок проведеного аналізу відомих рівнянь вимірювання РППЗС ПНТЕ з'ясовано їх певні недоліки, внаслідок яких стандартна невизначеність вимірювання за типом В може бути досить значною. Враховуючи проведений аналіз, запропоновано нове рівняння вимірювання РППЗС, яке забезпечує як малу методичну похибку, так і суттєво менше значення стандартної невизначеності вимірювання за типом В у порівнянні з відовими рівняннями вимірювання. Крім того, запропоноване рівняння вимірювання дозволяє вилучити інструментальні компоненти невизначеності, які зумовлені засобами вимірювання НПС та НЗС. Використання запропонованого рівняння вимірювання може бути основою для розроблення методики атестації ПНТЕ без звірення з державним еталоном.

Список літератури

1. Hermach F.L. *Thermal Converters as ac-dc Transfer Standards for Current and voltage Measurements at Audio Frequencies* / F.L.Hermach // *J. Research NBS.* – 1952. – Vol. 48. – P. 121-138.
2. Williams E.S. *Thermal voltage converters and comparators for very accurate ac voltage measurements* / E.S.Williams // *J. Research NBS.* – 1971. – Vol. 75C. – P. 145-154.
3. Fluke. *Calibration: Philosophy in Practice, Principles of ac-dc Metrology. Second Edition.* – 1994.

4. Widdis F.C. The theory of Peltier and Thomson effects in thermal ac-dc transfer devices / F.C.Widdis // Proc. IEE. – 1962. – Monograph 497M.
5. Inglis B.D. Errors in thermal ac-dc transfer Arising from dc Reversal Difference / B.D.Inglis // Metrologia. – 1981. – Vol. 17. – P. 111-117.
6. Акнаев Р.Ф. Методы и средства обеспечения единства измерений напряжения переменного тока / Р.Ф. Акнаев, О.П. Галахова, Т.Б. Рождественская // Труды метрол. Ин-тов СССР. – 1972. – Вып. 138. – С. 47-57.
7. Wilkins F.J. Theoretical analysis of the ac-dc difference of the NPL multijunction thermal converter in the frequency range of dc-100 kHz and comparators for very accurate ac voltage measurements / F.J.Wilkins // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 1972. – Vol. 21. – P. 334-340.
8. Klonz M. Accurate thin film multijunction thermal converter on a Silicon chip / M. Klonz, T. Weimann // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 1989. – Vol. 38. – P. 335-337.
9. Hermach F.L. Multijunction Thermal Converters as the NBS Primary AC-DC Transfer Standards for AC Current and Voltage Measurements / F.L. Hermach, J.R. Kinrad // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 1987. – June, IM-36. – P. 300-306.
10. Klonz M. AC-DC transfer difference of the PTB – multijunction thermal converter in the frequency range from 10 Hz to 100 kHz / M. Klonz // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 1987. – Nov., IM-36. – P. 320-329.
11. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: справочник / Л.И. Анатычук. – К.: Наукова думка, 1979. – 768 с.
12. Manfred Klonz. Measuring Thermoelectric Effects in Converters with a Fast Reversed DC. PTB-E-47, Braunschweig, September. – 1994.
13. Inglis B.D. Ac-dc transfer measurement with a Precision of < 0,1 ppm / B.D. Inglis // Metrologia. – 1982. – Vol. 18. – P. 133-138.
14. Inglis B.D. A Method for the determination of ac-dc Transfer error in Thermoelements / B.D. Inglis // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 1978. – Vol. 27. – P. 440-444.
15. Kinard J. Determination of ac-dc difference in the 0.1-100 MHz Frequency range / J. Kinard, Ti-XiongCai // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 1989. – Vol. 38, No.2. – P. 202-204.
16. Tuz Yu.M. Automated System for Measuring AC-DC Transfer Difference of TVC's / Yu.M. Tuz, V.V. Litvikh // Proc. International conf. on precision electromagnetic measurements «СРЕМ-2000». – Sydney (Australia). – 2000. – P. 385-386.
17. Эталон низкочастотного переменного напряжения / Ю.М. Туз, В.Ю. Каминский, В.В. Литвих, С.В. Андреев // Труды II Междунар. конф. «Метрология в электронике-97». – Х.: Государственное НПО «Метрология», 1997. – С. 72-74.
18. Туз Ю.М. Специальный эталон напряжения переменного тока для диапазона частот 10 Гц – 30 МГц / Ю.М. Туз, В.В. Литвих, В.Ю. Каминский // Труды II Междунар. конф. «Метрология в электронике-97». – Х.: Государственное НПО «Метрология», 1997. – С. 75-77.
19. Туз Ю.М. Деякі питання створення еталону низькочастотної напруги змінного струму / Ю.М. Туз, В.В. Литвих, В.Ю. Каминський // Український метрологічний журнал. – 1998. – № 1. – С. 31-34.
20. ISO VIM(DGUID 99999.20 International Vocabulary of Basic AND General Terms in Metrology (VIM). – Third edition. – ISO, 2008.-145 p.
21. ДСТУ 2681-94. Метрологія. Терміни та визначення.
22. ГОСТ 8.458-82 (СТ СЭВ 1056-78). Преобразователи и компараторы термоэлектрические образцовые. Методы и средства поверки.
23. Захаров И.П. Теория неопределенности в измерениях: учеб. пособие / И.П. Захаров, В.Д. Кукуш. – Х., 2002 – 256 с.
24. РГМ 43-2001. ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений».

Надійшла до редколегії 29.04.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Є.Т. Володарський, Національний технічний університет України «КПІ», Київ.

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗНОСТИ ПЕРЕХОДА С ПОСТОЯННОГО НА ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ

В.В. Литвих, А.О. Назаренко

Проведен анализ уравнений измерения разности перехода с постоянного на переменный ток преобразователей напряжения термоэлектрических (ПНТЭ). Проанализирована методическая погрешность, которая возникает при использовании некоторых уравнений измерения разности перехода с постоянного на переменный ток ПНТЭ. Предложено и проанализировано новое уравнение измерения. Доказано, что при его использовании инструментальная компонента неопределенности по типу В при измерении разности перехода с постоянного на переменный ток ПНТЭ не превышает 0,026 ppm.

Ключевые слова: неопределенность измерения, уравнение измерения, преобразователь напряжения термоэлектрический, разность перехода с постоянного на переменный ток.

THE UNCERTAINTY OF TVC'S AC-DC TRANSFER DIFFERENCE MEASUREMENT

V.V. Litvikh, A.O. Nazarenko

There were analyzed ac-dc transfer difference measurement equations for thermal voltage converters (TVC). There was also analyzed the method error arising when using some equations of TVC's ac-dc transfer difference measurement. The new measurement equation was proposed and analyzed by the authors. They have argued that when using this equation the Type B instrumental component of uncertainty at measuring TVC's ac-dc transfer difference does not exceed 0.026 ppm.

Keywords: measurement uncertainty, measurement equation, TVC, ac-dc transfer difference.