

УДК 389.14

О.Н. Величко, М.Н. Сурду, С.Н. Шевкун

ГП «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів», Київ, Україна

ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ КАЛИБРОВКИ РАБОЧИХ ЭТАЛОНОВ ИНДУКТИВНОСТИ НА ГОСУДАРСТВЕННОМ ПЕРВИЧНОМ ЭТАЛОНЕ ЕДИНИЦ ИНДУКТИВНОСТИ И ТАНГЕНСА УГЛА ПОТЕРЬ

Представлены материалы по оценке суммарной стандартной и расширенной неопределенности измерений при калибровке рабочих эталонов индуктивности на Государственном первичном эталоне единиц индуктивности и тангенса угла потерь. Приведена методика получения расширенной неопределенности.

Ключевые слова: эталон, мера индуктивности, суммарная стандартная неопределенность, расширенная неопределенность.

Введение

Развитие государства в сферах науки, техники и экономики неразрывно связано с постоянным совершенствованием системы измерений, контроля и испытаний при разработке, производстве и эксплуатации продукции. И оно невозможно без обеспечения единства и соответствующей точности измерений в государстве. Именно измерениям уделяется достаточно пристальное внимание. Постоянно увеличиваются требования к их точности, расширяются пределы измерений различных физических величин.

Единство измерений на национальном уровне базируется на системе государственных эталонов, которые обеспечивают воспроизведение единицы физической величины и ее передачу вторичным и/или рабочим эталонам разных разрядов, от которых размер единицы этой величины передается к рабочим средствам измерительной техники.

Усиление процесса международной интеграции в экономике, науке и промышленности требует гармонизации отечественных нормативных документов с международными документами и единства в подходе к представлению результата измерений. Так во многих важных для Украины отраслях для решения практических метрологических задач широко применяется теория погрешностей. Но современное состояние эталонной базы многих развитых стран для оценки метрологических характеристик эталонов предусматривает применение наряду с теорией погрешностей еще и теорию неопределенности.

В Украине в национальных нормативных документах внедряются положения Международного руководства по оценке неопределенности измерений (GUM) [1, 2]. Так ДСТУ 3231:2007 [3] предусматривает определение для эталонов не только необходимых погрешностей, но и оценку неопределенностей измерений.

Цель статьи – представить основные положения методики оценки суммарной стандартной и расширенной неопределенности измерений при калиб-

ровке рабочих эталонов индуктивности на Государственном первичном эталоне единиц индуктивности и тангенса угла потерь ДЕТУ 08-09-09, основанной на современном подходе к обработке результатов измерений [4].

Основной материал

1. Основные положения. Калибровка рабочих эталонов индуктивности на Государственном первичном эталоне ДЕТУ 08-09-09 выполняется методом прямых измерений, т.е. непосредственно, поэтому оценка неопределенности результатов калибровки выполняется без составления уравнения измерения (так как коэффициенты влияния стандартных неопределенностей равняются 1).

Для калибровки рабочих эталонов индуктивности необходимо осуществить передачу размера единицы с эталонной меры емкости номиналом 100 пФ либо 10 пФ, имеющей соответствующий сертификат калибровки, в котором указана неопределенность калибровки. Такие меры входят в состав Государственного эталона единиц электрической емкости и тангенса угла потерь ДЕТУ 08-06-01 в виде группы из трех эталонных мер типа АН11А номиналом 100 пФ и трех эталонных мер типа АН11А номиналом 10 пФ. Эталонные меры, входящие в данную группу, непрерывно исследуются, начиная с 1998 г. В настоящее время, благодаря собственным исследованиям, исследованиям, проведенным в РТВ и прослеживаемости к эталонам ведущих национальных метрологических институтов – NIST (США) и NPL (Великобритания), значения электрической емкости эталонных мер АН11А, входящих в группу известно с расширенной неопределенностью $U(C_{АН})=1,0 \cdot 10^{-6}$ при коэффициенте охвата $k=2$.

При калибровке рабочих эталонов индуктивности используется набор переходных (промежуточных) мер емкости, номинальные параметры которых имеют десятичные значения, а для воспроизведения единицы индуктивности посредством единиц

электрической емкости и частоты на этой частоте рационально иметь меры емкости, кратные 2,5 (например, 25 нФ, 250 нФ).

Пример передачи размера единицы физической

величины при калибровке меры индуктивности номиналом 1 Гн с опорой на эталонную меру емкости 100 пФ и использованием ряда промежуточных мер емкости и индуктивности указан на рис. 1.

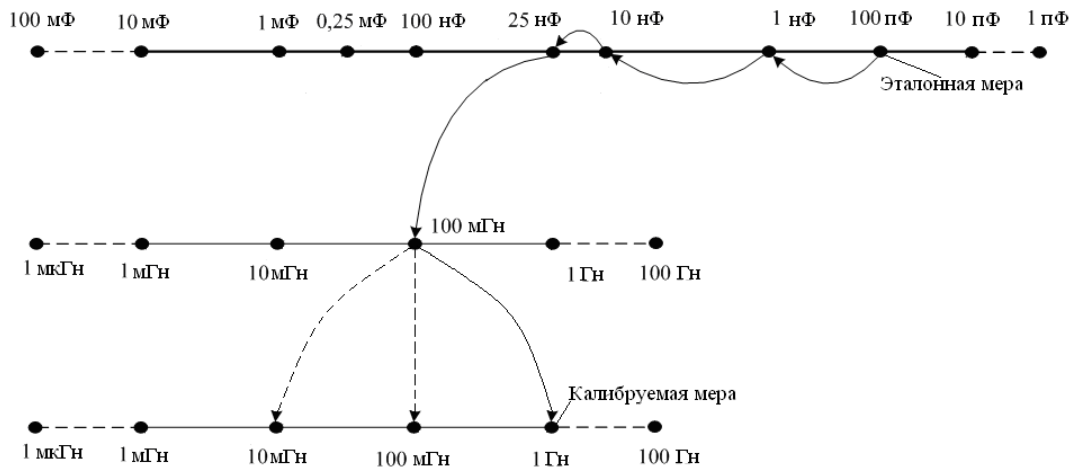


Рис. 1. Пример передачи размера единицы физической величины при калибровке меры индуктивности

Передача размера единицы от меры к мере другого разряда (рабочему эталону – РЭ) осуществляется при помощи компаратора [5], который входит в состав эталона ДЕТУ 08-09-09.

Компаратор создан на базе автотрансформаторных мостов и осуществляет:

- передачу размеров единиц какого-либо параметра импеданса (емкости, индуктивности, активно-го сопротивления) во всем диапазоне значений;
- воспроизведение единицы индуктивности, опираясь на единицы емкости и частоты в диапазоне от 10 мГн до 1 Гн.

2. Оценка неопределенности при калибровке рабочего эталона индуктивности. При калибровке РЭ индуктивности посредством передачи размера физической величины от эталонной меры емкости номиналом 100 пФ через промежуточные меры 1 нФ → 10 нФ → 25 нФ → 100 мГн и далее к 1 Гн (10 мГн, 1 мГн) в бюджет неопределенности входят такие составляющие:

$$u(C_{АН,100пФ}); \sum u(C_{\epsilon\Sigma,100пФ} \rightarrow \dots \rightarrow L_{\epsilon\Sigma,1Гн})$$

и $u(L_X)$.

Расчет суммарной стандартной (u_C) и расширенной (U) неопределенности при передаче размера физической величины от эталонной меры электрической емкости типа АН11А номиналом 100 пФ к калибруемой мере индуктивности L_X номиналом 1 Гн производится по формулам (1, 2):

$$u_C(C_{100пФ} \rightarrow L_X) = \sqrt{u^2(C_{АН,100пФ}) + \sum_{i=1}^N u_i^2(C_{\epsilon\Sigma}) + u^2(C_{\epsilon\Sigma} \rightarrow L_{\epsilon\Sigma}) + \sum_{j=1}^M u_j^2(L_{\epsilon\Sigma}) + u^2(L_M \rightarrow L_X)}, \quad (1)$$

где $u(C_{АН,100пФ}) = U(C_{АН,100пФ})/2 = 1,0 \cdot 10^{-6}/2 = 5,0 \cdot 10^{-7}$ – расширенная неопределенность при коэффициенте охвата $k=2$ для эталонной меры электрической емкости типа АН11А номиналом 100 пФ; $u_i(C_{\epsilon\Sigma})$ – суммарная стандартная неопределенность, вызванная погрешностью передачи размера единицы физической величины от меры емкости к мере емкости другого разряда; $u(C_{\epsilon\Sigma} \rightarrow L_{\epsilon\Sigma})$ – суммарная стандартная неопределенность, вызванная погрешностью передачи размера единицы физической величины от меры емкости к мере индуктивности; $u_j(L_{\epsilon\Sigma})$ – суммарная стандартная неопределенность, вызванная погрешностью передачи размера единицы физической величины от меры индуктивности к мере индуктивности; $u(L_M \rightarrow L_X)$ – суммарная стандартная неопределенность, вызванная погрешностью передачи размера единицы физической величины от М-ой меры индуктивности к калибруемой мере индуктивности L_X ;

$$U(C_{100пФ} \rightarrow L_X) = k \cdot u_C(C_{100пФ} \rightarrow L_X). \quad (2)$$

Расчет суммарной стандартной ($u_{\epsilon\Sigma}$) и расширенной ($U_{\epsilon\Sigma}$), вызванной погрешностью передачи размера единицы физической величины от эталонной меры емкости номиналом 100 пФ через промежуточные меры 1 нФ → 10 нФ → 25 нФ → 100 мГн и далее к 1 Гн производится следующим образом:

1. При передаче размера единицы от эталонной меры емкости номиналом в 100 пФ к промежуточной мере в 1 нФ:

а) суммарная стандартная неопределенность составляет:

$$u_{\epsilon\Sigma}(C_{100пФ-1нФ}) = \sqrt{(u_{НСП}/3)^2 + u_{СКО}^2} = 1,202 \cdot 10^{-7},$$

где $u_{НСП}$ – стандартная неопределенность, вызванная неисключенной систематической погрешностью (НСП) передачи размера единицы физической величины ($u_{НСП} = 2 \cdot 10^{-7}$); $u_{СКО}$ – стандартная неопределенность, вызванная среднеквадратическим отклонением (СКО) передачи размера единицы физиче-

ской величины ($u_{СКО} = 1 \cdot 10^{-7}$). При этом следует учесть, что значения $u_{НСП}$ и $u_{СКО}$ получены на основе расчетных и экспериментальных данных, представленных в табл. 1 от номинала к номиналу десятичных значений промежуточных мер из состава эталона ДЕТУ 08-09-09;

Таблица 1

Обобщенные результаты оценки неопределенности передачи размера единицы физической величины от эталонной меры емкости номиналом 100 пФ через промежуточные меры
1 нФ → 10 нФ → 25 нФ → 100 мГн и далее к калибруемой мере L_X

| Направление передачи размера единицы физической величины ДЕТУ 08-09-09 | Стандартная неопределенность, вызванная НСП передачи размера единицы физической величины | Стандартная неопределенность, вызванная СКО передачи размера единицы физической величины | Суммарная стандартная неопределенность передачи размера единицы физической величины | Расширенная неопределенность, передачи размера единицы физической величины |
|--|--|--|---|--|
| Передача размера единицы физической величины от меры емкости к мере емкости | | | | |
| 100 пФ – 1 нФ | $2 \cdot 10^{-7}$ | $1 \cdot 10^{-7}$ | $1,202 \cdot 10^{-7}$ | $2,404 \cdot 10^{-7}$ |
| 1 нФ – 10 нФ | $2 \cdot 10^{-7}$ | $1 \cdot 10^{-7}$ | $1,202 \cdot 10^{-7}$ | $2,404 \cdot 10^{-7}$ |
| 10 нФ – 25 нФ | $2 \cdot 10^{-7}$ | $1 \cdot 10^{-7}$ | $1,202 \cdot 10^{-7}$ | $2,404 \cdot 10^{-7}$ |
| Передача размера единицы физической величины от меры емкости к мере индуктивности | | | | |
| 25 нФ – 100 мГн | $1 \cdot 10^{-5}$ | $5 \cdot 10^{-7}$ | $3,37 \cdot 10^{-6}$ | $6,74 \cdot 10^{-6}$ |
| Передача размера единицы физической величины от меры индуктивности к мере индуктивности | | | | |
| 100 мГн – 1 Гн | $1 \cdot 10^{-5}$ | $1 \cdot 10^{-7}$ | $3,33 \cdot 10^{-6}$ | $6,67 \cdot 10^{-6}$ |
| 1 Гн – 10 Гн | $1 \cdot 10^{-5}$ | $1 \cdot 10^{-7}$ | $3,33 \cdot 10^{-6}$ | $6,67 \cdot 10^{-6}$ |
| 100 мГн – 10 мГн | $1 \cdot 10^{-5}$ | $1 \cdot 10^{-7}$ | $3,33 \cdot 10^{-6}$ | $6,67 \cdot 10^{-6}$ |
| 10 мГн – 1 мГн | $1 \cdot 10^{-5}$ | $1 \cdot 10^{-7}$ | $3,33 \cdot 10^{-6}$ | $6,67 \cdot 10^{-6}$ |
| Передача размера единицы физической величины от M-ой меры индуктивности к калибруемой мере индуктивности | | | | |
| 100 мГн – L_X | $1 \cdot 10^{-5}$ | $1 \cdot 10^{-7}$ | $3,33 \cdot 10^{-6}$ | $6,67 \cdot 10^{-6}$ |

б) расширенная неопределенность (при коэффициенте охвата $k=2$) составляет:

$$U_{\varepsilon\Sigma}(C_{100\text{пФ}-1\text{нФ}}) = k \cdot u_{\varepsilon\Sigma}(C_{100\text{пФ}-1\text{нФ}}) = 2 \cdot u_{\varepsilon\Sigma}(C_{100\text{пФ}-1\text{нФ}}) = 2,404 \cdot 10^{-7}.$$

2. При передаче размера единицы от промежуточной меры емкости в 1 нФ к промежуточной мере в 10 нФ:

а) суммарная стандартная неопределенность составляет:

$$u_{\varepsilon\Sigma}(C_{1\text{нФ}-10\text{нФ}}) = \sqrt{(u_{НСП}/3)^2 + u_{СКО}^2} = 1,202 \cdot 10^{-7},$$

где $u_{НСП} = 2 \cdot 10^{-7}$, $u_{СКО} = 1 \cdot 10^{-7}$;

б) расширенная неопределенность (при коэффициенте охвата $k=2$) составляет:

$$U_{\varepsilon\Sigma}(C_{1\text{нФ}-10\text{нФ}}) = k \cdot u_{\varepsilon\Sigma}(C_{1\text{нФ}-10\text{нФ}}) = 2 \cdot u_{\varepsilon\Sigma}(C_{1\text{нФ}-10\text{нФ}}) = 2,404 \cdot 10^{-7}.$$

3. При передаче размера единицы от промежуточной меры емкости в 10 нФ к промежуточной мере в 25 нФ:

а) суммарная стандартная неопределенность составляет:

$$u_{\varepsilon\Sigma}(C_{10\text{нФ}-25\text{нФ}}) = \sqrt{(u_{НСП}/3)^2 + u_{СКО}^2} = 1,202 \cdot 10^{-7},$$

где $u_{НСП} = 2 \cdot 10^{-7}$, $u_{СКО} = 1 \cdot 10^{-7}$;

б) расширенная неопределенность (при коэффициенте охвата $k=2$) составляет:

$$U_{\varepsilon\Sigma}(C_{10\text{нФ}-25\text{нФ}}) = k \cdot u_{\varepsilon\Sigma}(C_{10\text{нФ}-25\text{нФ}}) = 2 \cdot u_{\varepsilon\Sigma}(C_{10\text{нФ}-25\text{нФ}}) = 2,404 \cdot 10^{-7}.$$

4. При передаче размера единицы от промежуточной меры емкости в 25 нФ к мере индуктивности эталонной термостатированной с номинальным значением 100 мГн:

а) суммарная стандартная неопределенность составляет:

$$u_{\varepsilon\Sigma}(C_{25\text{нФ}} \rightarrow L_{100\text{мГн}}) = \sqrt{(u_{НСП}/3)^2 + u_{СКО}^2} = 3,37 \cdot 10^{-6},$$

где $u_{НСП} = 1 \cdot 10^{-5}$, $u_{СКО} = 5 \cdot 10^{-7}$;

б) расширенная неопределенность (при коэффициенте охвата $k=2$) составляет:

$$U_{\varepsilon\Sigma}(C_{25\text{нФ}} \rightarrow L_{100\text{мГн}}) = k \cdot u_{\varepsilon\Sigma}(C_{25\text{нФ}} \rightarrow L_{100\text{мГн}}) = 2 \cdot u_{\varepsilon\Sigma}(C_{25\text{нФ}} \rightarrow L_{100\text{мГн}}) = 6,74 \cdot 10^{-6}.$$

5. При передаче размера единицы от меры индуктивности эталонной термостатированной с номинальным значением 100 мГн к промежуточной мере в 1 Гн:

а) суммарная стандартная неопределенность составляет:

$$u_{\Sigma}(L_{100\text{мГн}} - I_{\text{Гн}}) = \sqrt{(u_{\text{НСП}}/3)^2 + u_{\text{СКО}}^2} = 3,33 \cdot 10^{-6},$$

где $u_{\text{НСП}} = 1 \cdot 10^{-5}$, $u_{\text{СКО}} = 1 \cdot 10^{-7}$;

б) расширенная неопределенность (при коэффициенте охвата $k = 2$) составляет:

$$U_{\Sigma}(L_{100\text{мГн}} - I_{\text{Гн}}) = k \cdot u_{\Sigma}(L_{100\text{мГн}} - I_{\text{Гн}}) = 2 \cdot u_{\Sigma}(L_{100\text{мГн}} - I_{\text{Гн}}) = 6,67 \cdot 10^{-6}.$$

6. При передаче размера единицы от меры индуктивности эталонной термостатированной с номинальным значением 100 мГн к калибруемой мере L_X номиналом в 1 Гн (10 мГн, 100 мГн):

а) суммарная стандартная неопределенность составляет:

$$u_{\Sigma}(L_{100\text{мГн}} \rightarrow L_X) = \sqrt{(u_{\text{НСП}}/3)^2 + u_{\text{СКО}}^2} = 3,33 \cdot 10^{-6},$$

где $u_{\text{НСП}} = 1 \cdot 10^{-5}$, $u_{\text{СКО}} = 1 \cdot 10^{-7}$;

б) расширенная неопределенность (при коэффициенте охвата $k = 2$) составляет:

$$U_{\Sigma}(L_{100\text{мГн}} \rightarrow L_X) = k \cdot u_{\Sigma}(L_{100\text{мГн}} \rightarrow L_X) = 2 \cdot u_{\Sigma}(L_{100\text{мГн}} \rightarrow L_X) = 6,67 \cdot 10^{-6}.$$

Данные, приведенные в табл. 1, должны использоваться при оценке неопределенности результатов калибровки рабочих эталонов индуктивности. Численные значения стандартных неопределенностей, вызванных СКО и НСП передачи размера единицы физической величины, получены в ходе государственной метрологической аттестации Государственного эталона ДЕТУ 08-09-09.

При этом полный результат измерений будет иметь вид:

$$L_X \pm U(C_{100\text{пФ}} \rightarrow L_X), \quad (3)$$

где L_X – измеренное значение калибруемой меры индуктивности.

Следует отметить, что в суммарной стандартной неопределенности результата калибровки также необходимо учитывать составляющие, обусловленные влиянием таких факторов, как температурный коэффициент емкости (ТКЕ) мер и частотную зависимость передачи единицы при передаче размера от мер емкости к мерам индуктивности.

Меры емкости имеют $\text{ТКЕ} = 3 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, а нестабильность термостатирования мер составляет $\pm 0,002^\circ\text{C}$. При этом неопределенность, вносимая

нестабильностью термостатирования, будет составлять $6 \cdot 10^{-8}$.

Частотная нестабильность оказывает существенное влияние на результат измерений при передаче размера единицы от мер емкости к мерам индуктивности. Однако за время измерений частотный дрейф пренебрежимо мал, и неопределенность измерений составляет порядка $1 \cdot 10^{-10}$.

Таким образом, составляющими неопределенности, вносимыми ТКЕ мер и частотной зависимостью можно пренебречь.

Выводы

Проведенные исследования позволили разработать методику, позволяющую оценить суммарную стандартную и расширенную неопределенности измерений при калибровке рабочих эталонов индуктивности на Государственном первичном эталоне единиц индуктивности и тангенса угла потерь ДЕ-ТУ08-09-09 с опорой на эталонные меры емкости типа АН11А номиналом 100 пФ или 10 пФ. Использование разработанной методики позволит подготовить Государственный эталон ДЕТУ 08-09-09 к проведению очередного аудита КООМЕТ в 2011 г.

Список литературы

1. ISO/IEC Guide 98-3:2008. Uncertainty of measurement. – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement.
2. ДСТУ Н РМГ 43-2001. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. ГСИ. Применение "Руководства по выражению неопределенности измерений" (Рекомендації з міждержавної стандартизації).
3. ДСТУ 3231:2007. Метрологія. Еталони одиниць вимірювань державні, первинні та вторинні. Основні положення, порядок розроблення, затвердження, реєстрації, зберігання та застосування.
4. Методика оценивания неопределенности измерений при выполнении метрологических работ / И.П. Захаров, М.П. Сергиенко, О.Н. Величко, В.Н. Ченела // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. – Х.: ХУПС, 2006. – Вип. 6 (56). – С. 32-36.
5. Прецизионный компаратор для воспроизведения единицы индуктивности и передачи ее размера в диапазоне значений / М.Н. Сурду, А.А. Ахмадов, С.А. Ахмадов, С.Н. Курсин, А.Л. Ламеко, М.Я. Мухаровский // Укр. метролог. журнал. – 2008. – Вип. 4. – С. 14-23.

Поступила в редколлегию 21.12.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.В. Руженцев, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

ОЦІНКА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ КАЛІБРОВКИ РОБОЧИХ ЕТАЛОНІВ ІНДУКТИВНОСТІ НА ДЕРЖАВНОМУ ПЕРВИННОМУ ЕТАЛОНІ ОДИНИЦЬ ІНДУКТИВНОСТІ І ТАНГЕНСУ КУТА ВТРАТ

О.М. Величко, М.М. Сурду, С.М. Шевкун

Представлені матеріали щодо оцінки сумарної стандартної та розширеної невизначеності вимірювань при калібруванні робочих еталонів індуктивності на Державному первинному еталоні одиниць індуктивності і тангенсу кута втрат. Наведена методика отримання розширеної невизначеності.

Ключові слова: еталон, міра індуктивності, сумарна стандартна невизначеність, розширена невизначеність.

**THE EVALUATION OF THE UNCERTAINTY OF CALIBRATION RESULTS OF WORKING INDUCTANCE STANDARDS
AT THE NATIONAL PRIMARY INDUCTANCE AND LOSS TANGENT STANDARD**

O.M. Velychko, M.M. Surdu, S.M. Shevkun

Materials for the evaluation of the combined standard and expanded uncertainty of measurement under the calibration of working inductance standards at the National primary inductance and loss tangent standard are presented. The procedure of obtaining of expanded uncertainty is given.

Keywords: *standard, inductance measure, the combined standard uncertainty, the expanded uncertainty.*