

ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ НА СВЧ ПРИ ДИСТАНЦИОННОЙ КАЛИБРОВКЕ

Кандидаты техн. наук, доценты ГУСИНСКИЙ А. В., КОСТРИКИН А. М., асп. ЗЕЗЮЛИНА Т. К.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Лаборатории, использующие автоматизированные радиоизмерительные средства измерений (СИ), периодически посылают их в калибровочную лабораторию (КЛ) для получения свидетельства и соответствующих калибровочных величин, используемых при проведении собственных измерений. Калибровка осуществляется в последовательности, рекомендованной [1]. При калибровке в диапазоне СВЧ в основном рассматриваются такие источники неопределенностей, как конечная разрешающая способность калибруемого СИ ($\Delta_{\text{кв}}$), ограниченная точность эталонных СИ ($\Delta_{\text{эт}}$), рассогласование в измерительном тракте ($\Delta_{\text{рас}}$). Источники неопределенностей, связанные с влиянием окружающей среды, не учитываются, так как изменения в КЛ проходят при нормальных условиях влияющих величин, но нет гарантии, что эти условия будут воспроизведены, когда СИ будут эксплуатироваться в удаленной лаборатории. На практике при эксплуатации СИ в рабочих условиях появляется дополнительный источник неопределенности, связанный с отклонением влияющих величин от нормальных значений

($\Delta_{\text{доп}}$). Кроме того, параметры СИ могут измениться при транспортировке ($\Delta_{\text{тр}}$), что приводит к неопределенности, которую сложно оценить. Величины, влияющие на результат калибровки автоматизированных СИ диапазона СВЧ на каждом этапе их применения, приведены на рис. 1.

Дистанционная калибровка [2], использующая Интернет для передачи измерительной информации, устраняет эти недостатки, так как осуществляется непосредственно на месте эксплуатации СИ. Для проведения дистанционной калибровки используются транспортабельные эталонные СИ (ТЭСИ), которые пересылаются в удаленную лабораторию. С помощью специализированного программного обеспечения, позволяющего управлять процессом измерений с удаленной ЭВМ, подключенной к измерительной схеме, проводится калибровка автоматизированного СИ.

В этом случае дополнительные источники неопределенности повлияют на калибровочную характеристику ТЭСИ, что показано на рис. 2.

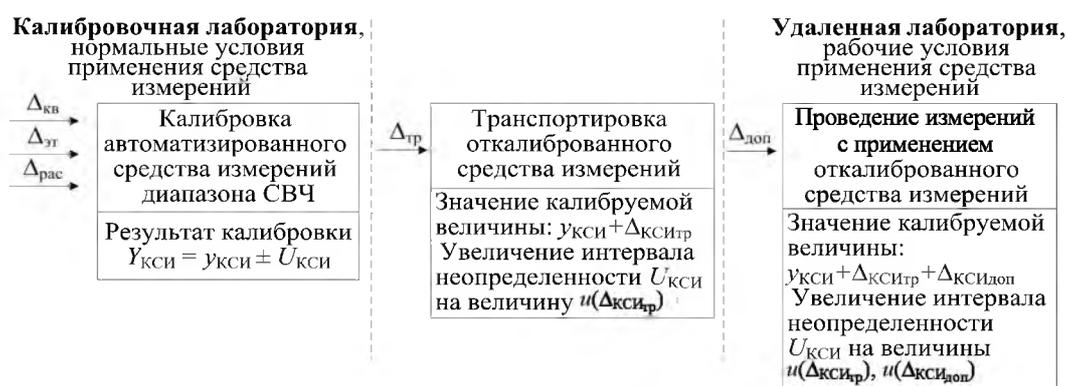


Рис. 1. Величины, влияющие на результат калибровки автоматизированных СИ диапазона СВЧ на каждом этапе их применения

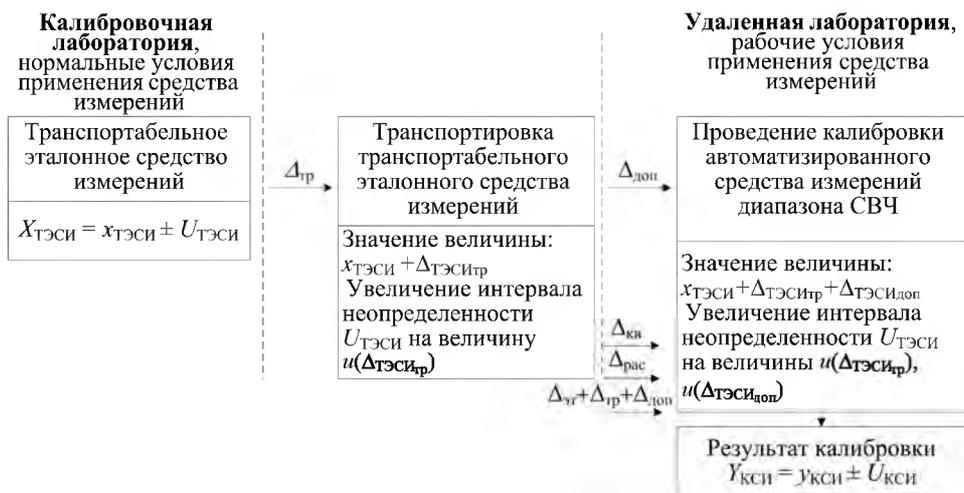


Рис. 2. Величины, влияющие на калибровочную характеристику ТЭСИ на каждом этапе их применения

Если неопределенность, возникающую из-за транспортировки автоматизированных СИ $u(\Delta_{КСИтр})$, сложно оценить для корректировки результата калибровки, то неопределенность, возникающую из-за транспортировки ТЭСИ $u(\Delta_{ТЭСИтр})$, можно оценить на основании двух калибровок, проведенных до транспортировки ТЭСИ в удаленную лабораторию и после их возвращения в КЛ с помощью методов дисперсионного анализа [3]. В этом случае проверяются две гипотезы – гипотеза о равенстве оценок входных величин, для которых проводился статистический анализ серий наблюдений, калибровочных характеристик ТЭСИ, и гипотеза о равенстве стандартных неопределенностей по типу А. При незначимом отличии оценок и стандартных неопределенностей по типу А калибровочные характеристики, полученные до транспортировки и после, считаются равными. При незначимом отличии оценок калибровочных характеристик, полученные до транспортировки и после, отличаются на пренебрежимо малую величину. Результаты наблюдений двух калибровок могут быть объединены как неравнорассеянные. Значимое различие оценок говорит о том, что транспортировка ТЭСИ оказывает значимое влияние на калибровочную характеристику ТЭСИ, результаты калибровки автоматизированного СИ корректируются на осно-

вании новой калибровочной характеристики ТЭСИ.

Дополнительные источники неопределенности, связанные с отклонением влияющих величин от нормальных значений, наиболее часто возникают из-за изменений температуры окружающей среды и питающего напряжения и выражаются в долях от основной погрешности СИ [4]. Интервал, в котором находится значение величины $\Delta_{допТ}$, из-за нахождения температуры в рабочей области значений будет иметь величину

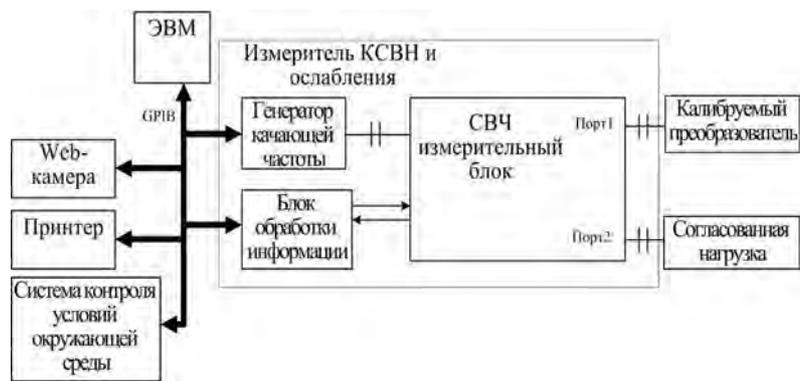


Рис. 3. Структурная схема дистанционной калибровки измерителей или преобразователей поглощаемой мощности при определении КСВН входа

$$a_{допТ} = k \Delta_{СИ} \frac{|T^\circ - 20^\circ|}{10^\circ}, \quad (1)$$

где $a_{допТ}$ – интервал, в котором находится значение влияющей величины $\Delta_{допТ}$; k – постоянный коэффициент, обычно равный 0,5 или 1,0.

Так как точность применяемых ТЭСИ выше точности калибруемых СИ в два и более раз, при дистанционной калибровке СИ в рабочих условиях интервалы $a_{ТЭСИдопТ}$ и $a_{КСИдопТ}$, а следовательно, и неопределенности $u(\Delta_{ТЭСИдопТ})$ и $u(\Delta_{КСИдопТ})$ будут отличаться на величину

$$\frac{u(\Delta_{КСИдопТ})}{u(\Delta_{ТЭСИдопТ})} = \frac{k_{КСИ}\Delta_{КСИ}}{k_{ТЭСИ}\Delta_{ТЭСИ}} = \frac{k_{КСИ}}{k_{ТЭСИ}} \cdot 2, \quad (2)$$

что позволяет сделать вывод об увеличении точности измерений.

Разработка математических моделей и алгоритмов расчета неопределенностей результатов измерений при дистанционной калибровке измерителей поглощаемой мощности. Калибровка измерителей поглощаемой мощности проводится в два этапа:

- 1) определение КСВН входа измерителя, или преобразователя поглощаемой мощности;
- 2) определение коэффициента эффективности измерителя или преобразователя поглощаемой мощности.

При определении КСВН входа измерителя или преобразователя поглощаемой мощности в удаленной лаборатории собирается измерительная схема, приведенная на рис. 3.

Математическая модель измерения будет иметь вид

$$K_{СТУ} = K_{СТУи} + \Delta_{эт} + \Delta_{рас}, \quad (3)$$

где $K_{СТУ}$ – оцениваемый КСВН входа измерителя или преобразователя поглощаемой мощности, о. е.; $K_{СТУи}$ – показание применяемого измерителя КСВН и ослабления (ИКО) или измерителя комплексных коэффициентов передачи и отражения (ИККПО), о. е.; $\Delta_{эт}$ – поправка, обусловленная ограниченной точностью применяемого ИКО или ИККПО в рабочих условиях эксплуатации, о. е.; $\Delta_{рас}$ – то же, рассогласованием в измерительном тракте, о. е.

Анализ входных величин. Для величины показание применяемого ИКО или ИККПО $K_{СТУи}$ получают n независимых наблюдений в одинаковых условиях измерения.

Способ оценки стандартной неопределенности – по типу А. Распределение величины – нормальное. Оценка величины определяется как среднее арифметическое значение или среднее из n наблюдений. Стандартная неопределенность $u(K_{СТУи})$, связанная с оценкой, определяется как стандартное отклонение среднего значения.

Поправка, обусловленная ограниченной точностью применяемого ИКО или ИККПО в рабочих условиях эксплуатации $\Delta_{эт}$. Способ оценки стандартной неопределенности – по типу В. Источником информации о входной величине служат данные, приведенные в свидетельстве о калибровке (стандартную неопределенность $u(\Delta_{эт})$, связанную с оценкой, получают делением приведенной в свидетельстве о калибровке неопределенности на соответствующий коэффициент охвата) или данные, приведенные в свидетельстве о поверке, РЭ применяемого ИКО или ИККПО (стандартную неопределенность получают делением величины интервала, в котором находится значение входной величины на $\sqrt{3}$).

Поправка, обусловленная рассогласованием в измерительном тракте $\Delta_{рас}$. Способ оценки стандартной неопределенности – по типу В. Распределение величины – арксинусоидальное. Оценка величины равна 0.

Интервал, в котором находится значение входной величины, определяется по формуле

$$\Delta_{рас} = \frac{4\Gamma_n \Gamma_n^2}{(1 - \Gamma_n)^2}, \quad \text{о. е.} \quad (4)$$

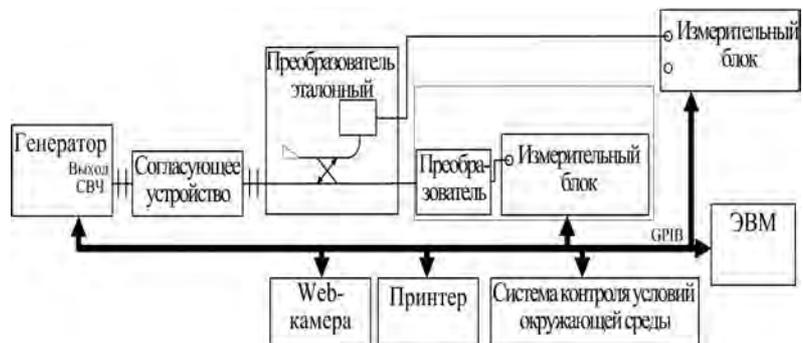


Рис. 4. Структурная схема дистанционной калибровки измерителей поглощаемой мощности при определении коэффициента эффективности методом непосредственного сличения



Рис. 5. Структурная схема дистанционной калибровки измерителей поглощаемой мощности при определении коэффициента эффективности методом сличения при помощи компаратора

где Γ_n – коэффициент отражения (КО) выхода ИКО или КО измерительного порта ИККПО; Γ_n – КО входа калибруемого измерителя или преобразователя мощности.

КСВН и КО связаны соотношением

$$\Gamma = \frac{K_{CTU} - 1}{K_{CTU} + 1} \quad (5)$$

Стандартную неопределенность $u(\Delta_{рас})$ получают делением величины интервала, в котором находится значение входной величины, на $\sqrt{2}$.

Входные величины рассматриваются как некоррелированные. Коэффициенты чувствительности равны 1 для каждой входной величины.

Суммарную стандартную неопределенность вычислим следующим образом:

$$u_c(K_{CTU}) = \sqrt{(1u(K_{CTU}))^2 + (1u(\Delta_{эт}))^2 + (1u(\Delta_{рас}))^2} \quad (6)$$

Расширенную неопределенность находим

$$U_{K_{CTU}} = k u_c(K_{CTU}), \quad (7)$$

где k – коэффициент охвата, который выбирается в зависимости от вида распределения вероятности измеряемой величины и установленного уровня доверия 95 %.

При определении коэффициента эффективности измерителя или преобразователя поглощаемой мощности в зависимости от метода измерений в удаленной лаборатории собирается одна из схем, приведенных на рис. 4, 5.

Математические модели измерения будут иметь вид:

1. При калибровке методом непосредственного сличения, в случае если эталонный изме-

ритель проходящей мощности отградуирован

в значениях проходящей мощности, калибруемый измеритель – в значениях поглощаемой мощности, коэффициент эффективности определяем по формуле

$$K_{эф} = \frac{P_x}{K_{K_{эт}} P_{эт}} \Delta_{рас_{x,эт}} \quad (8)$$

где $K_{эф}$ – коэффициент эффективности поглощаемой мощности, о. е.; $K_{K_{эт}}$ – калибровочный коэффициент эталонного измерителя проходящей мощности на частоте калибровки в рабочих условиях эксплуатации, о. е.; P_x – показание калибруемого измерителя поглощаемой мощности, мВт; $P_{эт}$ – то же эталонного измерителя проходящей мощности, мВт; $\Delta_{рас_{x,эт}}$ – поправка, обусловленная рассогласованием в измерительном тракте, о. е.

2. При калибровке методом сличения с помощью компаратора в случае если эталонный измеритель поглощаемой мощности отградуирован в значениях поглощаемой мощности, компаратор – в значениях проходящей мощности, коэффициент эффективности можно рассчитать

$$K_{эф} = K_{эф_{эт}} \frac{P_x P_{к_{эт}} \Delta_{рас_{x,x}}}{P_{к_x} P_{эт} \Delta_{рас_{эт,x}}} \quad (9)$$

где $K_{эф_{эт}}$ – коэффициент эффективности эталонного измерителя поглощаемой мощности на частоте калибровки в рабочих условиях эксплуатации, о. е.; $P_{к_x}$ – показание компаратора при измерениях с калибруемым измерителем поглощаемой мощности, мВт; $P_{к_{эт}}$ – то же с эталонным измерителем поглощаемой мощности, мВт; $\Delta_{рас_{x,x}}$ – поправка, обусловленная рассогласованием в измерительном тракте при измерениях с калибруемым измерителем поглощаемой мощности, о. е.; $\Delta_{рас_{эт,x}}$ – то же с эталонным измерителем поглощаемой мощности, о. е.

Коэффициент эффективности можно рассчитать по формулам (8) и (9), заменив входные величины их численными оценками.

Анализ входных величин. Калибровочный коэффициент эталонного измерителя проходящей мощности $K_{K_{эт}}$, коэффициент эффектив-

ности эталонного измерителя поглощаемой мощности в рабочих условиях эксплуатации $K_{эфэ}$.

Способ оценки стандартной неопределенности – по типу В. Источником информации о входной величине служат данные, приведенные в свидетельстве о калибровке (стандартную неопределенность ($u(K_{кэт})$, $u(K_{эфэ})$), связанную с оценкой, получают делением приведенной в свидетельстве о калибровке неопределенности на соответствующий коэффициент охвата), или данные, приведенные в свидетельстве о поверке, РЭ эталонного измерителя мощности (стандартную неопределенность получают делением величины интервала, в котором находится значение входной величины, на $\sqrt{3}$).

Для величин показания измерителей мощности P_x , $P_{эт}$, $P_{кx}$, $P_{кэт}$ получают n независимых наблюдений в одинаковых условиях измерения. Способ оценки стандартной неопределенности – по типу А. Распределение величины – нормальное. Оценивание стандартной неопределенности может основываться на любых методах статистической обработки данных. Оценкой величин будет среднее арифметическое значение или среднее из n наблюдений. Стандартные неопределенности, связанные с оценкой, оцениваются как стандартное отклонение среднего значения.

Поправка, обусловленная рассогласованием в измерительном тракте $\Delta_{рас\ x,эт}$, $\Delta_{рас\ x,к}$, $\Delta_{рас\ эт,к}$.

Способ оценки стандартной неопределенности – по типу В. Распределение величины – арксинусоидальное. Оценка величины равна 1.

Границы отклонений для величины определяются по формулам:

$$1) \quad \Delta_{рас} = 1 \pm 2|\Gamma_x||\Gamma_{эт}|, \quad (10)$$

где Γ_x – коэффициент отражения входа калибруемого измерителя поглощаемой мощности, о. е.; $\Gamma_{эт}$ – то же выхода эталонного измерителя проходящей мощности, о. е.;

$$2) \quad \Delta_{рас} = 1 \pm 2|\Gamma_k||\Gamma_{x,эт}|, \quad (11)$$

Γ_k – коэффициент отражения выхода компаратора, о. е.; $\Gamma_{x,эт}$ – то же входа калибруемого или эталонного измерителя поглощаемой мощности, подключенного к выходу компаратора, о. е.

Стандартную неопределенность $u(\Delta_{рас})$ получают делением величины интервала, в кото-

ром находится значение входной величины, на $\sqrt{2}$.

Входные величины рассматриваются как некоррелированные.

Коэффициенты чувствительности рассчитываем по формулам:

$$1) \quad \begin{aligned} c_{K_{кэт}} &= -\frac{P_x}{K_{кэт}^2 P_{эт}} \Delta_{рас\ x,эт}; \\ c_{P_x} &= \frac{1}{K_{кэт} P_{эт}} \Delta_{рас\ x,эт}; \\ c_{P_{эт}} &= -\frac{P_x}{K_{кэт} P_{эт}^2} \Delta_{рас\ x,эт}; \\ c_{\Delta_{рас\ x,эт}} &= \frac{P_x}{K_{кэт} P_{эт}}; \end{aligned} \quad (12)$$

$$2) \quad \begin{aligned} c_{K_{эфэ}} &= \frac{P_x P_{кэт} \Delta_{x,к}}{P_{кx} P_{эт} \Delta_{эт,к}}; \\ c_{P_x} &= \frac{K_{эфэ} P_{кэт} \Delta_{x,к}}{P_{кx} P_{эт} \Delta_{эт,к}}; \\ c_{P_{кx}} &= -K_{эфэ} \frac{P_x P_{кэт} \Delta_{x,к}}{P_{кx}^2 P_{эт} \Delta_{эт,к}}; \\ c_{P_{кэт}} &= K_{эфэ} \frac{P_x}{P_{кx}} \frac{1}{P_{эт}} \frac{\Delta_{x,к}}{\Delta_{эт,к}}; \\ c_{P_{эт}} &= -K_{эфэ} \frac{P_x P_{кэт} \Delta_{x,к}}{P_{кx} P_{эт}^2 \Delta_{эт,к}}; \\ c_{\Delta_{x,к}} &= K_{эфэ} \frac{P_x P_{кэт}}{P_{кx} P_{эт}} \frac{1}{\Delta_{эт,к}}; \\ c_{\Delta_{эт,к}} &= -K_{эфэ} \frac{P_x P_{кэт} \Delta_{x,к}}{P_{кx} P_{эт} \Delta_{эт,к}^2}. \end{aligned} \quad (13)$$

Суммарные стандартные неопределенности вычисляем:

$$1) \quad u_c(K_{эфэ}) = \sqrt{(c_{K_{кэт}} u(K_{кэт}))^2 + (c_{P_x} u(P_x))^2 + (c_{P_{эт}} u(P_{эт}))^2 + (c_{\Delta_{рас\ x,эт}} u(\Delta_{рас\ x,эт}))^2}; \quad (14)$$

2)

$$u_c(K_{эф}) = \sqrt{(c_{K_{эфт}} u(K_{эфт}))^2 + (c_{P_x} u(P_x))^2 + (c_{P_{кx}} u(P_{кx}))^2 + (c_{P_{кэт}} u(P_{кэт}))^2 + (c_{P_{эт}} u(P_{эт}))^2 + (c_{\Delta_{рас_{x,x}}} u(\Delta_{рас_{x,x}}))^2 + (c_{\Delta_{рас_{эт,к}}} u(\Delta_{рас_{эт,к}}))^2} \quad (15)$$

Расширенную неопределенность найдем по формуле

$$U_{K_{эф}} = k u_c(K_{эф}). \quad (16)$$

Разработка математической модели и алгоритма расчета неопределенности результатов измерений при дистанционной калибровке частотомеров электронно-счетных. При калибровке частотомеров электронно-счетных измерения проводятся в два этапа:

- 1) определение отклонения частоты опорного генератора от частоты эталонного сигнала;
- 2) определение поправки из-за дискретности счета.

Определение отклонения частоты опорного генератора от частоты эталонного сигнала целесообразно проводить с помощью приемника-компаратора методом прямых измерений. Измерительная схема, собираемая в удаленной лаборатории, будет иметь вид, представленный на рис. 6.

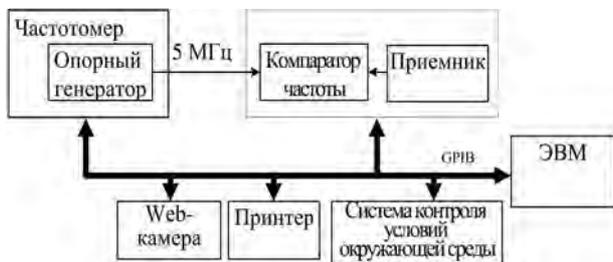


Рис. 6. Структурная схема дистанционной калибровки частотомеров электронно-счетных при определении отклонения частоты опорного генератора от частоты эталонного сигнала

Разрабатываемые в настоящее время приемники-компараторы имеют помимо традиционной для частотных компараторов функции сличения двух внешних частот (частота опорного генератора по отношению к частоте сигналов эталонных частот, передаваемых радиостанциями длинных волн) функцию сравнения с частотной шкалой космических навигационных систем ГЛОНАСС/GPS [5, 6]. Данная функция позволяет исключить из состава измерительной схемы квантовый стандарт частоты и использовать в качестве эталона сигнал ГЛОНАСС/GPS.

При определении поправки из-за дискретности счета частотомера собирается измерительная схема, приведенная на рис. 7.

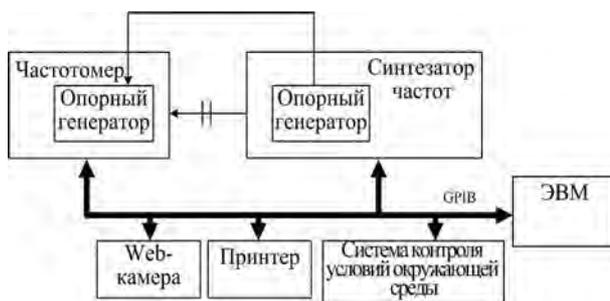


Рис. 7. Структурная схема дистанционной калибровки частотомеров электронно-счетных при определении поправки из-за дискретности счета частотомера

При калибровке частотомеров электронно-счетных математическая модель измерений будет иметь вид

$$f = f_n + \Delta_{откл} + \frac{\Delta_{дискр}}{t_{сч}}, \quad \text{Гц}, \quad (17)$$

где f – оцениваемое значение частоты, Гц; f_n – номинальное значение частоты, Гц; $\Delta_{откл}$ – отклонение частоты опорного генератора от частоты эталонного сигнала, Гц; $t_{сч}$ – время счета калибруемого частотомера; $\Delta_{дискр}$ – поправка из-за дискретности счета,

$$\Delta_{дискр} = f_u - f_{эт}, \quad \text{Гц}, \quad (18)$$

f_u – показание калибруемого частотомера, Гц; $f_{эт}$ – значение частоты, установленное на синтезаторе частот, Гц.

Значение частоты в точке калибровки рассчитывается по (17), заменяя входные величины их численными оценками.

Анализ входных величин. Для величин $\Delta_{откл}$ и $\Delta_{дискр}$ получают n независимых наблюдений в одинаковых условиях измерения. Способ оценки стандартной неопределенности – по типу A . Распределение величины – нормальное. Оценкой величины будет среднее арифметическое значение или среднее из n наблюдений. Стандартная неопределенность, связанная с оценкой, оценивается как стандартное отклонение среднего значения.

Входные величины рассматриваются как некоррелированные. Коэффициенты чувствительности равны 1 для величины $\Delta_{откл}$, $c_{\Delta_{дискр}} = \frac{1}{t_{сч}}$ – для величины $\Delta_{дискр}$.

Суммарная стандартная неопределенность вычисляется по формуле

$$u_c(f) = \sqrt{(1u(\Delta_{\text{откл}}))^2 + \left(\frac{1}{t_{\text{сч}}}u(\Delta_{\text{дискр}})\right)^2}. \quad (19)$$

Расширенную неопределенность находим

$$U_f = ku_c(f). \quad (20)$$

ВЫВОД

Применение метода дистанционной калибровки автоматизированных СИ диапазона СВЧ на местах их эксплуатации не только сократит время, затрачиваемое на калибровку, но и позволит уменьшить интервалы неопределенностей при измерениях, внесет вклад в обеспечение единства измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ефремова, Н. Ю.** Оценка неопределенности в измерениях: практ. пособие / Н. Ю. Ефремова. – Минск: БелГИМ, 2003. – 50 с.

2. **Способ** дистанционного контроля метрологических характеристик автоматизированных радиоизмерительных приборов диапазона СВЧ: пат. 12574 Респ. Беларусь, МПК (2006) G 01R 17/00 / А. В. Гусинский, А. М. Кострикин, Т. К. Толочко; заявитель Бел. гос. ун-т информ. и радиоэл. – № а 20061301; заявл. 20.12.06; опубл. 30.10.09 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 5. – С. 127.

3. **Кострикин, А. М.** Теоретическая метрология: учеб. пособие: в 3 ч. / А. М. Кострикин. – Минск, БГУИР. – 1999. – Ч. 2. – 87 с.

4. **Дворяшин, Б. В.** Основы метрологии и радиоизмерения: учеб. пособие для вузов / Б. В. Дворяшин. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.

5. **Приемник-компаратор** сигналов спутниковых радионавигационных систем: пат. № 2379834 РФ, МПК H04B 1/06 / В. В. Акулов, А. В. Воробейчиков, Р. Н. Новожилов; заявитель Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт «Кварц». – № 2008104712/09; заявл. 07.02.08; опубл. 20.01.10 // Офиц. бюл. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2010. – № 2.

6. **Черногубов, А. В.** Средства измерений для радиоэлектронного комплекса / А. В. Черногубов // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2008. – № 3. – С. 114–117.

Поступила 10.03.2010