

МОДЕЛЬ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГИДРОФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Зори А.А., Коренев В.Д., Гигов Х.И.

Донецкий национальный технический университет, каф. ЭТ, г. Донецк, Украина

Технический университет, каф. ЭТ, г. Варна, Болгария

E-mail: kaf-et@kita.dgtu.donetsk.ua

Abstract

Zory A.A., Korenev V.D., Gigov H.I. Model of temperature measuring device instrumental error of the hydrophysical informatively-measuring system. The model of instrumental error of measuring device of temperature of the hydrophysical informatively-measuring system is developed, the basic constituents of errors of transformers of measuring chain are set, classification of making errors is executed, sources and reasons of their origin are analysed, the methods of exception of making errors are offered.

Постановка задачи. В работах отечественных и зарубежных океанологов на основе анализа результатов измерений параметров тонкой структуры и турбулентности вод Мирового океана приведены оценки пространственно – временной изменчивости полей температуры океанских вод и определена требуемая точность измерения температуры посредством зондирующих информационно-измерительных систем (ИИС). Установлено, что инструментальная погрешность измерителей температуры гидрофизических ИИС не должна превышать $\pm 0,01$ °C [1]. К сожалению, даже самые совершенные измерители систем не обеспечивают поставленные требования по точности и характеризуются существенно большим значением инструментальной погрешности: $\Delta_T = \pm 0,05$ °C [2]. На пути устранения указанного несоответствия необходимо, прежде всего, выполнить исследования инструментальной погрешности измерителей с целью выявления доминирующих погрешностей, вносящих основной вклад, и анализа причин и источников их появления. Результаты исследований позволят наметить пути и способы их снижения.

Метод решения. Исследование инструментальной погрешности средства измерений (СИ) предусматривает построение модели погрешностей СИ, анализ составляющих и суммарной погрешности на основе модели. Модель погрешностей представляет собой зависимость (не обязательно математическую) суммарной погрешности СИ от составляющих погрешностей, возникающих в преобразовательных элементах измерительной цепи СИ под воздействием неинформативных параметров среды, внешних и внутренних дестабилизирующих факторов. Построение модели может осуществляться структурным методом [3,4] и предусматривает:

- установление путем исследования принципа действия последовательности измерительных преобразований, выполняемых в СИ, с определением их входных величин;
- построение измерительной цепи СИ с выделением в ней совокупности измерительных преобразователей - простейших звеньев, выполняющих преобразование входной величины x_i в величину x_{i+1} с однозначной функцией преобразования f_i (таких преобразователей при исследовании принципа действия СИ можно выделить достаточно много);
- разработку (составление) математических моделей измерительных преобразователей, входящих в измерительную цепь СИ;
- формирование структурной схемы СИ, отображающей способы соединения преобразователей в измерительной цепи СИ и используемые методы измерительных преобразований (прямого преобразования и уравнивающего преобразования);

- установление составляющих погрешностей измерительных преобразователей, входящих в измерительную цепь СИ; формирование моделей составляющих погрешностей измерительных преобразователей на основе их свойств и моделей;
- изучение и классификацию погрешностей на основе их моделей с учетом различных внешних и внутренних факторов, выявление составляющих, вносящих основной вклад, установление и анализ причин и источников их появления, разработку путей и способов снижения составляющих погрешностей.

Такой подход позволяет оценить вклад составляющих погрешностей, возникающих в преобразовательных элементах измерительной цепи, в суммарную погрешность СИ независимо от физической природы преобразователей, дает возможность минимизировать суммарную погрешность и оптимизировать, при необходимости, структуру СИ на основе известных методов измерительных преобразований.

Решение задачи. В гидрофизических информационно-измерительных системах (ИИС) используются измерители температуры в виде термометров сопротивления (ТС). Принцип действия их основан на зависимости электрического сопротивления чувствительного элемента (металлического или полупроводникового терморезистора) от температуры. Для одновременного выполнения динамических измерений (например, при зондировании) и измерений пульсаций температуры в локальном объеме водной среды применяют термометры сопротивления на основе неравновесных мостов. Цепь измерительных преобразований в схеме термометра сопротивления на основе неравновесного моста показана на рис. 1.

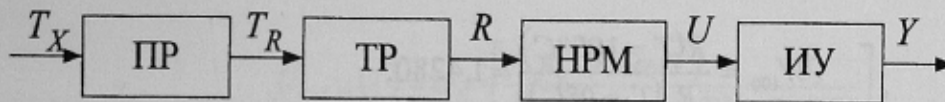


Рисунок 1- Измерительная цепь термометра сопротивления.

Первый измерительный преобразователь *ПР* преобразует измеряемую температуру T_X среды в температуру T_R терморезистора, второй (терморезистор) *ТР* - температуру T_R в изменение сопротивления R , третий (неравновесный резистивный мост) *НРМ* - сопротивление R в напряжение U , четвертый (усилитель измерительный) *ИУ* - напряжение U в выходной сигнал Y . Преобразователь *ПР* одновременно с преобразованием температуры T_X в температуру T_R выполняет защиту терморезистора от неинформативных воздействий исследуемой среды. Он определяет динамику работы измерителя, является источником методической погрешности, но в статическом режиме вклад в инструментальную погрешность измерителя не вносит.

Функции чувствительного элемента измерителя выполняет металлический терморезистор *ТР* (медный или платиновый, реже – никелевый). Такой резистор, выполненный из чистого металла, имеет линейную зависимость электрического сопротивления от температуры и характеризуется высокой стабильностью и воспроизводимостью свойств. Полупроводниковые терморезисторы имеют более высокий температурный коэффициент сопротивления (ТКС) α , чем металлические, и меньшие размеры (вплоть до точечных). Но в гидрофизических измерительных устройствах они не применяются, поскольку не обеспечивают требуемую точность измерения средней температуры из-за нелинейной зависимости сопротивления от температуры и нестабильности параметров.

Терморезисторы из химически чистой платины, применяемые в эталонных и образцовых СИ, обеспечивают высокую точность измерения температуры: $\Delta_T = \pm(1...3) \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$. Возможности платиновых терморезисторов, предназначенных для применения в гидрофизических измерителях, значительно скромнее. Они обеспечивают $\Delta_T = \pm 0,03 \text{ }^\circ\text{C}$ из-за применения в них менее чистой платины. Близки им по точности более дешевые медные терморезисторы. Вывод: погрешность, вносимая преобразователем температуры, является аддитивной, носит

случайный характер и может быть уменьшена только за счет применения в них материалов более высокого качества.

Источником еще одной аддитивной составляющей погрешности преобразователя TP является отклонение сопротивления терморезистора от номинального значения. Согласно ГОСТ 6651-78 допускаемое отклонение сопротивления платиновых и медных терморезисторов II класса не должно превышать $\pm 0,1\%$ от номинального значения резистора при температуре $T=0^\circ\text{C}$. Для проволочного медного терморезистора, имеющего номинальное сопротивление $R_0=50\text{Ом}$ при $T=0^\circ\text{C}$, отклонение ΔR_0 не должно превышать $\pm 0,05\text{ Ом}$. Появляющаяся за счет этого погрешность является систематической, остается неизменной в диапазоне измерения (аддитивная) и не превышает значения

$$\Delta_{TP}^A = \frac{\Delta R_0}{\alpha \cdot R_0} = \frac{\pm 0,05\text{ Ом}}{4,28 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/^\circ\text{C} \cdot 50\text{ Ом}} = \pm 0,23^\circ\text{C},$$

где $\alpha=4,28 \cdot 10^{-3}^\circ\text{C}^{-1}$ – номинальное значение ТКС меди.

Источником мультипликативной составляющей погрешности преобразователя TP может быть отклонение ТКС терморезистора от номинального значения $\alpha=4,28 \cdot 10^{-3}^\circ\text{C}^{-1}$. Оценить предельно возможное значение мультипликативной составляющей погрешности можно по значению допускаемого отклонения относительного сопротивления терморезистора W_{100} . По ГОСТ 6651-78 номинальное значение W_{100} медного резистора равно:

$$W_{100} = \frac{R(T=100^\circ\text{C})}{R_0(T=0^\circ\text{C})} = 1,4280,$$

а допускаемое отклонение ΔW_{100} медного резистора II класса при температуре $T=100^\circ\text{C}$ не превышает значения:

$$\Delta W_{100} = \frac{\Delta R(T=100^\circ\text{C})}{R(T=100^\circ\text{C})} = \pm 0,0010.$$

Отклонение относительного сопротивления ΔW_{100} обусловлено изменением ТКС α . Допускаемое отклонение $\Delta\alpha$ от номинального, соответствующее значению $\Delta W_{100}=\pm 0,0010$, можно определить:

$$\Delta\alpha = \frac{(\Delta W)}{100^\circ\text{C}} = \frac{\pm 0,0010}{100^\circ\text{C}} = \pm 1 \cdot 10^{-5} (1/^\circ\text{C}).$$

Мультипликативная составляющая погрешности при $T=100^\circ\text{C}$ не превышает:

$$\Delta_{TP}^M = \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \cdot T = \frac{\pm 1 \cdot 10^{-5}}{4,28 \cdot 10^{-3}} \cdot 100 = \pm 0,23^\circ\text{C}.$$

Вывод: составляющие Δ_{TP}^A и Δ_{TP}^M могут быть исключены при градуировке измерителя в термостате.

Неравновесный мост, образованный резисторами R_1, R_2, R'_3, R''_3 и R_T (см. рис.2), характеризуется двумя составляющих погрешности. Одна из них (погрешность от неточности подбора сопротивлений плеч моста) устраняется в процессе градуировки измерителя в термостате при $T=0^\circ\text{C}$ балансировкой моста переменным резистором R''_3 (одновременно исключается и аддитивная составляющая погрешности терморезистора Δ_{TP}^A).

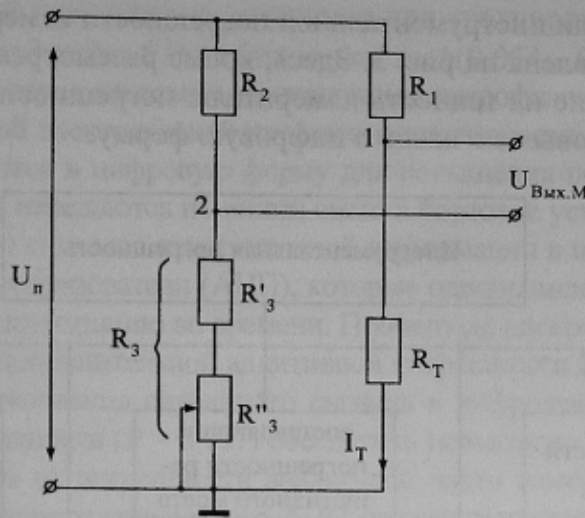


Рисунок 2 - Схема неравновесного резистивного моста измерителя температуры.

Другая составляющая погрешности моста обусловлена нелинейностью его характеристики преобразования по температуре чувствительного элемента. Даже если зависимость сопротивления терморезистора от температуры линейна, выходное напряжение ненагруженного моста (рис.2) связано с температурой нелинейной зависимостью:

$$U_{\text{вх.М}}(T) = U_{\text{п}} \cdot \left[\frac{R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T)}{R_1 + R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T)} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right], \quad (1)$$

где $U_{\text{п}}$ — напряжение питания моста.

Обычно в качестве номинальной характеристики преобразования измерителя температуры принимается линейная зависимость $Y=f(T_X)$, что приводит к появлению составляющей погрешности, обусловленной нелинейностью характеристика преобразования моста. Из выражения (1) следует [5], что погрешность нелинейности уменьшается с увеличением отношения сопротивлений R_1/R_T и одновременным поддержанием номинального тока в терморезисторе при $T=0^\circ\text{C}$ и сохранении неизменной чувствительности моста (напряжение питания моста и мощность, рассеиваемая резистором R_1 , при этом растут). Анализ показывает, что уже при $R_1 \approx 10R_T$ погрешность нелинейности уменьшается до значения $\delta = \pm 0,5\%$. Таким образом, существует возможность снижения этой систематической составляющей погрешности измерителя до допустимого значения, выбрав $R_1 \gg R_T$, одновременно сохранив высокую чувствительность моста.

Измерительный усилитель ИУ, подключенный к выходу НРМ, выполняет усиление его выходного напряжения, пропорционального значению температуры T_X . Обычно ИУ выполняется по схеме разностного усилителя напряжения на основе ОУПТ и его инструментальная погрешность определяется тремя мультипликативными составляющими:

- температурным дрейфом напряжения смещения $U_{\text{см}}$ и разностного входного тока $\Delta I_{\text{вх.разн.}}$ ОУПТ;
- синфазной помехой, возникающей за счет конечного значения коэффициента ослабления синфазного сигнала (КОСС) ОУПТ;
- изменением коэффициента усиления измерительного усилителя в результате действия внешних и внутренних дестабилизирующих факторов.

Исключение указанных составляющих инструментальной погрешности ИУ несложно выполняется применением известных конструктивно - технологических и структурно – алгоритмических методов повышения точности электронных устройств [5, 6].

Структура модели инструментальной погрешности измерителя температуры гидрофизической ИИС представлена на рис. 3. Здесь, кроме рассмотренных выше погрешностей, учтены еще две, влияющие на точность измерителя: погрешность градуировки и погрешность преобразования аналоговых сигналов в цифровую форму.

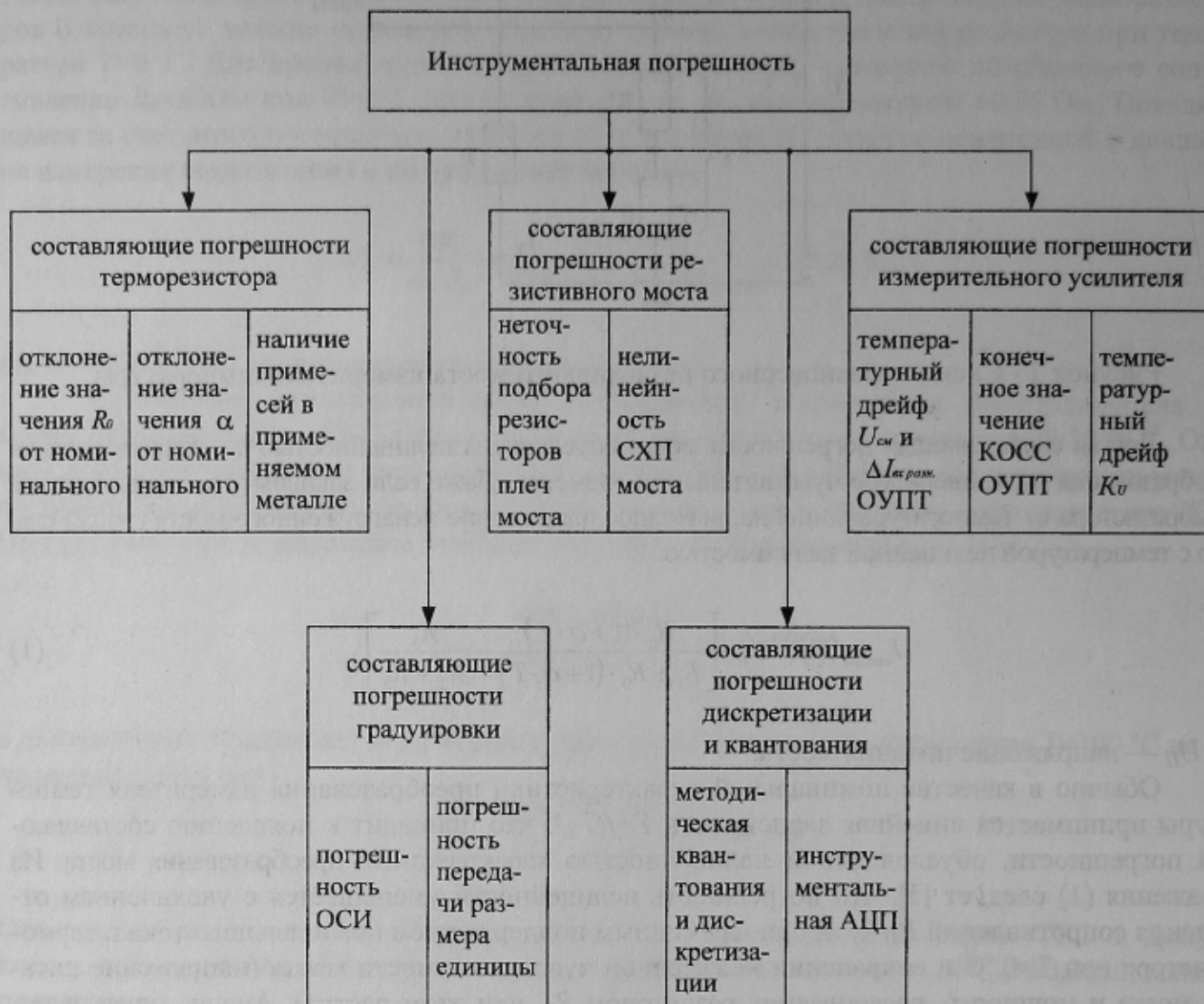


Рисунок 3 - Структура модели инструментальной погрешности измерителя температуры гидрофизической ИИС.

Измеритель температуры до установки его в систему подвергается градуировке (поверке), в результате которой определяются статическая характеристика преобразования и характеристики погрешности. Градуировка обычно выполняется в термостате методом сличения показаний градуируемого и образцового СИ. При этом инструментальная погрешность градуируемого СИ увеличивается за счет погрешности, вносимой при градуировке. Погрешность градуировки содержит две составляющие: погрешность образцового СИ и погрешность передачи размера единицы температуры. Поэтому градуировку гидрофизического измерителя температуры следует выполнять с применением образцового СИ температуры, доверительная погрешность которого ($P=0,95$) не превышает $\pm(0,002...0,004)^\circ\text{C}$ (ртутные стеклянные термометры, платиновые термометры сопротивления...), одновременно обеспечивая в термостате погрешность передачи размера единицы температуры такого же уровня. При

соблюдении данных требований погрешность, вносимая при градуировке, увеличит инструментальная погрешность градуируемого СИ не более, чем на $\pm(0,004...0,006)^\circ\text{C}$.

Выходные аналоговые сигналы измерителей первичных гидрофизических параметров водной среды (температуры, удельной электрической проводимости, скорости, давления ...) в забортном устройстве ИИС преобразуются в цифровую форму для повышения помехоустойчивости и в последовательном двоичном коде передаются по линии связи в бортовое устройство системы. Процессы преобразования аналоговых сигналов измерительной информации в цифровые в системе выполняют аналогово-цифровые преобразователи (АЦП), которые одновременно с квантованием сигнала по уровню выполняют и дискретизацию во времени. Процедуры дискретизации и квантования сигналов являются источниками дополнительной аддитивной погрешности ИИС. Известны [5] способы выбора разрядности преобразования случайного сигнала в цифровую форму, позволяющие при высокой доверительной вероятности ($P = 0,997$) обеспечить невысокую методическую погрешность преобразования: менее 10% от погрешности аналоговой части измерителя при (10...12)-ти разрядном АЦП. Выбор по разрядности конкретного АЦП должен выполняться с учетом его инструментальной погрешности.

Выводы.

В данной работе:

1. Разработана модель инструментальной погрешности измерителя температуры гидрофизической ИИС.
2. Установлены основные составляющие погрешностей преобразователей, входящих в измерительную цепь измерителя.
3. Выполнена классификация составляющих погрешностей, проанализированы источники и причины их возникновения.
4. Предложены способы уменьшения (исключения) значений составляющих погрешностей с помощью градуировки, а также конструктивно – технологических и структурно – алгоритмических методов повышения точности.

Литература

1. Калашников П.А. Первичная обработка гидрологической информации. – Л.: Гидрометеоздат, 1985. -152 с.
2. Парамонов А.И., Кушнир В.М., Заикин В.М. Автоматизация гидрофизического эксперимента. - Л.: Гидрометеоздат, 1982. -224 с.
3. Таланчук П.М., Руценко В.Г. Основы теории проектирования измерительных приборов. – К.: Вища школа, 1989. -454 с.
4. Сурикова Е.И. Погрешности приборов и измерений. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1975. -160 с.
5. Зори А.А., Коренев В.Д., Хламов М.Г. Методы и средства повышения точности электронных измерительных систем – Донецк :РИА ДонНТУ, 2004. -140 с.
6. Зори А.А., Коренев В.Д., Хламов М.Г. Повышение точности гидрофизических измерителей температуры. //Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: обчислювальна техніка та автоматизація. - Донецьк: ДонНТУ, 2005.–№90.-С. 188–192.