

ПРИЛАДИ І МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

УДК 621.37.36.39

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ТЕРМОМЕТРИЧЕСКИЙ МОСТ СА300

© Кромплас Б., Михаль А., Сурду М., 2003

НПП "Спецавтоматика", Институт электродинамики НАН Украины, Киев, Украина

Розглянуто структурні схеми трансформаторного мосту змінного струму загалом, а також його вимірювального кола. Міст дає змогу вимірювати опір еталонних платинових термометрів у діапазоні частот від 100 Гц до 1 кГц з похибкою менш ніж $2 \cdot 10^{-7}$. Наведено результати досліджень короткочасної стабільності метрологічних характеристик приладу.

Рассматриваются структурные схемы трансформаторного моста переменного тока в целом, а также его измерительной цепи. Мост позволяет измерять сопротивление эталонных платиновых термометров в диапазоне частот от 100 Гц до 1 кГц с погрешностью менее чем $2 \cdot 10^{-7}$. Приведены результаты исследования кратковременной стабильности метрологических характеристик прибора.

An accurate temperature bridge is described. Bridge has been developed for the investigation of the frequency dependence of the platinum resistance thermometer (SPRT) in frequency range from 100 Hz to 1 kHz with uncertainty better than $2 \cdot 10^{-7}$. The stability of measurement is presented.

В соответствии с Международной температурной шкалой МТШ–90, в диапазоне между тройной точкой равновесного водорода (13,8033 К) и точкой затвердевания серебра (961,78°C) температуры определяют с помощью платиновых термометров сопротивления (ПТС), "отградуированных в определенных наборах основных реперных точек с использованием установленных интерполяционных формул". Как правило, ПТС включается в одно из плеч моста постоянного или переменного тока. Поскольку погрешность интерполяции МТШ–90 составляет 0,0001 К, то измерительные мосты должны иметь погрешность, приведенную к концу диапазона, не хуже $(1-3)10^{-7}$.

При измерении на постоянном токе наличие термоэлектродвижущей силы, фликер-шумов в элементах и других дестабилизирующих факторов существенно ограничивает точность измерения. Изменение направления тока, протекающего через ПТС, минимизирует только некоторые составляющие погрешности. Такие принципы построения положены в основу лучших моделей мостов ведущих фирм: Guild line и Measurements International. Переход к измерению на переменном токе синусоидальной формы позволяет

обеспечить некоторые преимущества: потенциально более высокую чувствительность вследствие лучшего соотношения сигнал – помеха, использование масштабных высокоточных преобразователей с тесной индуктивной связью. Наилучшие результаты в этом направлении получены фирмами Tinsley и ASL. Первые термометрические мосты переменного тока, имевшие коммерческий успех, имели рабочие частоты в диапазоне 435 – 325 Гц. Впоследствии частота была снижена и, сегодня один из лучших мостов – модель F18 фирмы ASL имеет частоту 75(25) Гц. Однако даже на таких сравнительно низких частотах, при измерении сопротивления с приведенной чувствительностью больше 10^{-6} возникает разница в результатах измерения на постоянном и переменном токах. Она обусловлена сложной эквивалентной схемой ПТС, шунтирующим влиянием элементов конструкции, поверхностным эффектом в проводе чувствительного элемента. Каждая из этих составляющих вносит максимальный вклад в своей области температур. Для устранения этих погрешностей и более точного сопоставления результатов измерений на постоянном и переменном токах необходимо знание частотных

характеристик ПТС, которые практически не изучены из-за отсутствия соответствующих средств измерения.

Для решения этой задачи нами разработана оригинальная многоконтурная мостовая измерительная цепь, позволяющая измерять сопротивление ПТС с чувствительностью лучше 10^{-7} в диапазоне частот 125 – 975 Гц. По требованиям потребителя может быть изготовлена модификация моста с любой фиксированной рабочей частотой из такого ряда:

$$F_p = 125 + n \times 50, \quad (1)$$

где n – целое положительное число.

Упрощенная структурная схема моста переменного тока для измерения сопротивления ПТС изображена на рис. 1. Работа моста полностью автоматизирована и управляется с помощью микроконтроллера (МК). Мостовая измерительная цепь (МИЦ) питается синусоидальным напряжением рабочей частоты (1) от генератора (Г) и выдает сигнал неравновесия на усилитель (УС). Усиленный сигнал неравновесия детектируется и интегрируется по двум каналам – синфазному и квадратурному, для выделения активной и реактивной составляющих сигнала неравновесия. Детектирование осуществляется с помощью двух синхронных детекторов (СД1 и СД2) с управляющими сигналами, сдвинутыми по фазе на 90° (при помощи фазовращающей цепи (ФЦ)). Интегрирование обоих сигналов (синфазного и квадратурного) происходит в интеграторах (Инт1 и Инт2) за время, кратное периодам рабочей частоты и частоты промышленной сети, что

позволяет быстро и эффективно подавлять сетевую помеху. Выпрямленные сигналы через коммутатор (К2) поступают на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и поочередно измеряются. Функционально усилитель, коммутаторы, синхронные детекторы, интеграторы и АЦП образуют функциональный блок, обозначаемый как детектор равновесия, который выпрямляет и преобразует в цифровой код сигнал неравновесия, выделяемый мостовой измерительной цепью.

Результаты измерения АЦП поступают в микроконтроллер для обработки. В результате этой обработки микроконтроллер выдает управляющий код для мостовой измерительной цепи (во время уравнивания) и выводит результат измерения на устройство ввода-вывода информации (УВВ). В приборе предусмотрена калибровка синфазного и квадратурного каналов, во время которой определяют неидентичность их коэффициентов передачи и смещений нуля (для этого на их входы через калибровочный коммутатор (К1) подается от генератора исходный сигнал рабочей частоты).

Структурная схема мостовой измерительной цепи изображена на рис. 2. В ее основу положены трансформаторные узлы с тесной индуктивной связью. Она содержит основной и вспомогательный контуры регулирования. МИЦ обеспечивает четырехпарное подключение ПТС и внутренней меры сопротивления, а также эффективную защиту от электрических и магнитных помех.

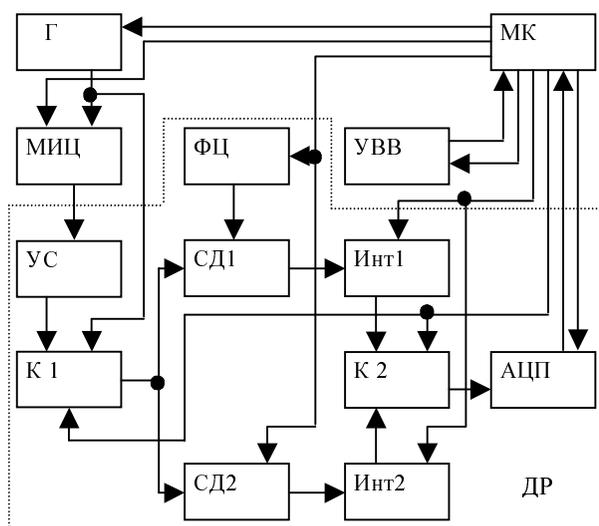


Рис. 1. Схема моста переменного тока для измерения сопротивления ПТС

МИЦ содержит два трансформатора T_1 и T_2 , образцовую меру сопротивления R_0 , объект измерения R_X и повторитель напряжения (ПН). На рис. 2 через R_Σ обозначено суммарное сопротивление подводящих проводов и сопротивление обмотки m'_3 трансформатора T_2 . Индуктивный делитель T_1 служит для формирования на обмотке m_2 напряжения, пропорционального управляющему коду и падению напряжения на образцовой мере R_0 . Он выполнен на базе технологии, обеспечивающей тесную индуктивную связь, что позволяет реализовать высокую точность отношения витков (m_0/m_1) и линейность коэффициента преобразования обмотки m_1 .

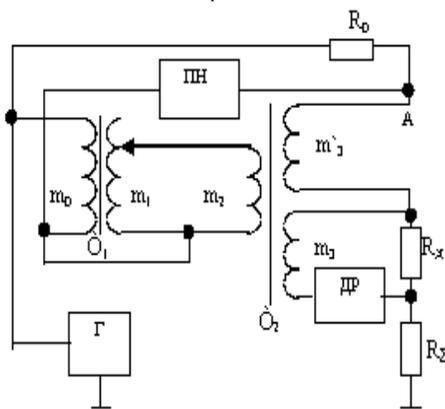


Рис. 2. Структурная схема мостовой измерительной цепи

Конструктивно индуктивный делитель выполнен в виде четырех двоичных триад. Двенадцатизрядный двоичный код управления триадами делителя формирует микроконтроллер. Индуктивный делитель T_2 служит для задания заранее выбранного отношения максимального значения сопротивления объекта измерения и сопротивления образцовой меры. Вторичные обмотки m_3 и m'_3 индуктивного делителя T_2 выполнены экранированным проводом и включены в основной и вспомогательный контуры МИЦ. Основной контур МИЦ служит для сравнения напряжения на объекте измерения с напряжением на обмотке m_3 трансформатора T_2 и формирования сигнала неравновесия. Вспомогательный контур регулирования необходим для создания режима короткого замыкания для образцовой меры R_0 . Для этого обмотка m'_3 включается последовательно с объектом измерения R_X . Так как в точке равновесия напряжение на обмотке m_3 равно и противофазно напряжению на объекте измерения, сигнал неравновесия вспомогательного контура (напряжение в точке А) стремится к нулю. Остаточный сигнал неравновесия в точке А практически равен

падению напряжения, вызванного протеканием рабочего тока по суммарному сопротивлению проводов R_Σ . Этот сигнал при помощи повторителя напряжения ПН вводится последовательно с напряжением генератора, так что на индуктивный делитель T_1 поступает напряжение, равное напряжению на образцовой мере R_0 .

При уравнивании изменением количества витков (m_1) индуктивного делителя T_1 добиваются равенства напряжений U_{m_3} и U_{R_X} , о чем свидетельствует нулевое показание детектора равновесия (ДР). Уравнение равновесия моста имеет вид:

$$(U_\Gamma - U_A \times (1 - \delta_{\text{ПН}}) \times m_1 \times m_3 / m_0 \times m_2 = I_X \times R_X, \quad (2)$$

где $I_X = (U_\Gamma - U_A) / R_0$; $\delta_{\text{ПН}}$ – погрешность коэффициента передачи повторителя напряжения ПН.

В состоянии равновесия значение искомой величины R_X определяется из отношения:

$$R_X = R_0 \times m_1 \times m_3 \times (1 - \delta_{R_\Sigma} \delta_{\text{ПН}}) / (m_0 \times m_2), \quad (3)$$

где $\delta_{R_\Sigma} = R_\Sigma / R_0$.

Из уравнения (3) видно, что ненулевое значение сопротивления подводящих проводов R_Σ и ненулевое значение погрешности коэффициента передачи повторителя ПН приводят к появлению мультипликативной погрешности измерения. При использовании современных микросхем в рассматриваемом диапазоне частот $\delta_{\text{ПН}}$ обычно составляет $10^{-4} - 10^{-5}$. Для реально используемых образцовых мер (100 Ом – 1 КОм) относительное значение подводящих проводов δ_{R_Σ} обычно лежит в пределах $10^{-3} - 10^{-4}$. Поэтому рассматриваемое явление приводит к появлению мультипликативной погрешности измерения порядка $10^{-7} - 10^{-9}$, что допустимо для этого вида измерений.

На основе рассмотренных структурных схем в НПП "Спецавтоматика" совместно с ИЕД АН Украины разработан прецизионный термометрический мост переменного тока СА300. Диапазон измерения определяется мерами ТОМ-0,1 или ТОМ-1, входящими в комплект моста. Каждая из поставляемых мер термостатирована. Температурный коэффициент меры составляет менее 0.1 ppm на 1°C температуры воздуха. Предусмотрен режим калибровки по внешнему эталону сопротивления, при котором мультипликативная погрешность моста определяется погрешностью эталона.

Измерительная цепь позволяет работать в диапазоне частот. Нами создано три модификации моста с частотами 975, 325 и 125 Гц с практически одинаковыми метрологическими характеристиками. Ниже, на рис. 3–5, представлены исследования кратковременной стабильности при разном времени усреднения.

Основные технические характеристики прибора

Тип характеристики		В автономном режиме без усреднения	При работе с ПК без усреднения	При работе с ПК с усреднением n=10
Диапазон измерения, Ом	для ТОМ1	0-124,99999	0-124,99999	0-124,999999
	для ТОМ 0,1	0-12,499999	0-12,499999	0-12,4999999
Среднеквадратическое отклонение		$1,3 \times 10^{-7}$	9×10^{-8}	4×10^{-8}
Погрешность линейности функции преобразования		2×10^{-7}	2×10^{-7}	
Количество измерений при усреднении, (n)		8	от 2 до 49	

- * Время одного измерения, сек3
- * Рабочий ток, мА: – для ТОМ 1.....1
- для ТОМ 0,13
- * Масса (совместно с ТОМ 1 и ТОМ 0,1), кг5
- * Габариты, мм290x120x320

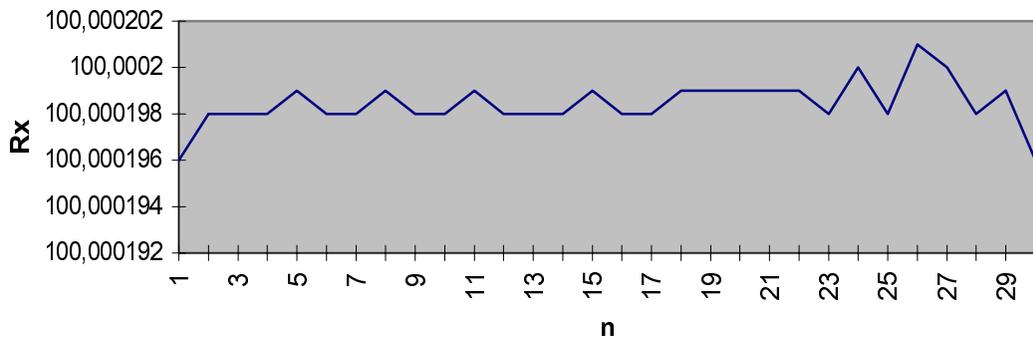


Рис. 3. MC3020, №077, t=24.4, N=40

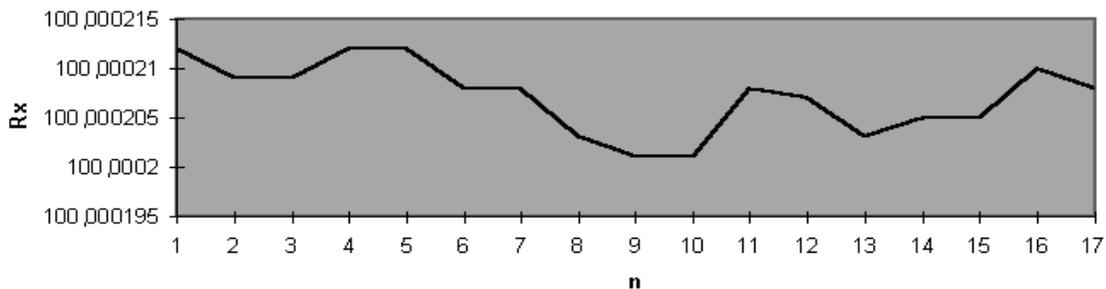


Рис. 4. MC3020, №077, t=24.5, N=20

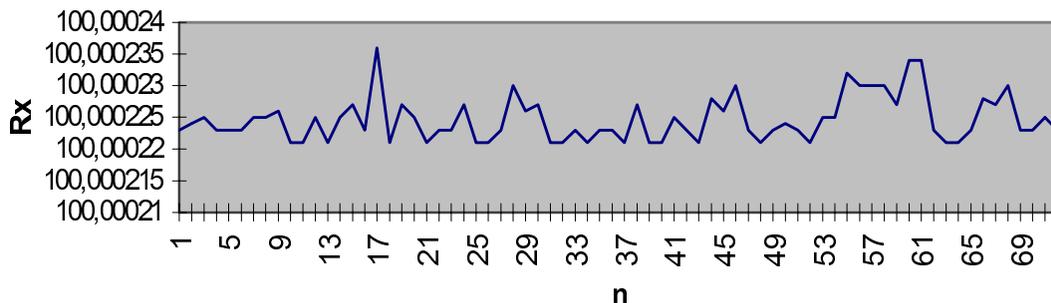


Рис. 5. MC3020, №077, t=25.3, N=10

Каждый n -й результат измерений определялся как среднее из, соответственно, $N = 40, 20$ и 10 отсчетов значений сопротивления измеряемого объекта. Приведенные данные показывают, что на интервале в несколько суток СКО результатов измерения находится в пределах $(2-8) \times 10^{-8}$ (эквивалентная чувствительность по температуре составляет $5-20 \mu\text{K}$).

СА300 по основным метрологическим характеристикам не уступает лучшим мировым образцам. В то же время он имеет в пять раз меньшие габариты и

вес, минимальное электропотребление, встроенную термостатированную меру сопротивления, что упрощает его эксплуатацию и повышает мобильность. Мост прошел апробацию в ведущих метрологических центрах Украины и России. Несколько экземпляров моста используются во ВНИИМ г. Санкт-Петербург и ВНИИФТРИ Московская обл. В процессе эксплуатации экспериментально подтверждены высокие метрологические характеристики термометрического моста СА300.

УДК 536.1

СТАТИСТИЧНО-ДЕФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ СТАБІЛІЗАЦІЇ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

© Стадник Б.^{1,2}, Яцишин С.¹, 2003

¹Національний університет "Львівська політехніка", кафедра інформаційно-вимірювальних технологій, вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

²Ряшівська політехніка, вул. В. Поля, 235-959, Ряшів, Польща

На підставі сукупності експериментальних досліджень з позицій термодинаміки нерівноважних процесів обґрунтована статистично-деформаційна модель стабілізації метрологічних характеристик термоперетворювачів.

На основании совокупности экспериментальных исследований с позиций термодинамики неравновесных процессов обосновывают статистически-деформационную модель стабилизации метрологических характеристик термопреобразователей.

According to experimental investigations and thermodynamics of unbalanced processes there were based statistic-deformation model of stabilization for transducers' metrology characteristics.

Вступ. Сучасні технологічні процеси мікроелектроніки, що часто містять елементи нанотехнологій, вимагають точності вимірювання температури, близької до еталонних засобів. Водночас, вимірюючи температуру за допомогою перетворювачів температури (надалі – ПТ), на практиці вважають, що існує можливість підвищити їх точність, використовуючи конструктивно-технологічні прийоми на етапі проектування й виготовлення. Досягти такої точності із застосуванням лише традиційних методів уже неможливо. Виникла необхідність реалізувати прийоми мікроелектронного рівня та керувати термодинамічними процесами, що відбуваються в об'ємі та на поверхні матеріалу чутливого елемента (ЧЕ) ПТ.

Постановка проблеми. У [1, 2] запропоновано феноменологічний підхід з використанням елементів термодинаміки, в основу якого покладено напружений

стан матеріалу ЧЕ. На підставі встановленого збільшення енергії Гіббса σ^2/k_U для ПТ обґрунтовано введення додаткових, зумовлених цією енергією, термодинамічних потоку й сили \bar{X} : $\bar{X} = \nabla(\sigma^2/2k_U) = \sigma/k_U \nabla \sigma$.

Недоліки та способи їх вирішення. Хоча подальші експериментальні дослідження характеризуються певною систематикою та строгістю, проте не було розвинуто концептуальний механізм урахування дії згаданих термодинамічної сили та термодинамічного потоку на номінальні статичні характеристики (НСХ). Ускладнює ситуацію залежність механічних властивостей від температури. Крім того, реальні матеріали ЧЕ переважно не підлягають безпосередній дії зовнішніх механічних напружень,