

Предлагаемое устройство относится к измерительной технике и может найти применение при создании приборов, предназначенных для прецизионного измерения температуры посредством термометров сопротивления.

Известен ряд устройств для измерения температуры, измерительная цепь которых представляет собой мостовую схему, в одно из плеч которой включен термометр сопротивления [1, 2, 3]. К недостаткам этих устройств следует отнести нелинейность функции преобразования низкую помехозащищенность, большое число образцовых мер.

Наиболее близкое техническое решение, выбранное нами в качестве прототипа, представляет собой трансформаторный мост переменного тока [4], содержащий первый трансформатор, первая первичная обмотка которого подключена к выходам генератора, первый из которых соединен с общей шиной, второй трансформатор, повторитель напряжения, образцовый резистор, термометр сопротивления, подключенный первым и вторым потенциальными выводами соответственно к первому входу детектора равновесия непосредственно и к его второму входу через последовательно включенные первые вторичные обмотки первого и второго трансформаторов, а первым токовым выводом - через вторую вторичную обмотку первого трансформатора к одному выводу второй вторичной обмотки второго трансформатора, один вывод третьей регулируемой вторичной обмотки первого трансформатора подключен к общей шине.

Описанное устройство позволяет получить высокую линейность функции преобразования и сравнительно высокую точность измерения. Однако препятствием к дальнейшему повышению точности является то, что образцовый резистор  $R_0$  включен по двухзажимной схеме.

Такое включение образцового резистора приводит к появлению погрешности измерения, обусловленной сопротивлениями подводящих проводов токовой цепи образцового регистра  $R_0$  и термометра сопротивление  $R_t$ , а также омического сопротивления обмоток трансформаторов, переходных сопротивлений паек и контактов разъемов (если термометр сопротивления подключен при помощи разборного соединения).

Функция преобразования устройства - прототипа имеет аддитивную и мультипликативную составляющие погрешности, которые зависят от параметра  $R_n$  - суммарного значения сопротивления проводов, включенных последовательно с образцовой мерой  $R_0$  и термометром сопротивления  $R_t$ .

Для уменьшения этих составляющих погрешности измерения необходимо уменьшить суммарное сопротивление  $R_n$  и увеличивать значение сопротивления образцового резистора  $R_0$ .

Для уменьшения сопротивления  $R_n$  необходимо термометр сопротивления присоединять при помощи неразборного соединения, уменьшить длину и увеличивать сечение его подводящих проводов, вторичные нерегулируемые обмотки трансформаторов выполнять толстым проводом.

При всех принятых мерах суммарное сопротивление  $R_n$  трудно выполнить менее 1 Ом. Увеличение значения сопротивления образцового резистора также имеет свой предел, так как для сохранения заданного значения крутизны преобразования необходимо поддерживать неизменным ток через образцовый резистор  $R_0$  и термометр  $R_t$ .

При увеличении сопротивления меры  $R_0$ , необходимо пропорционально увеличивать и напряжение на вторичной нерегулируемой обмотке трансформатора (увеличить количество ее витков). При этом увеличивается омическое сопротивление обмотки, что уменьшает ожидаемый эффект и резко, по квадратичному закону увеличивается рассеиваемая мощность на образцовом резисторе  $R_0$ . Перегрев этого резистора приводит к появлению дополнительной погрешности измерения. На практике оптимальное значение образцового резистора обычно не превышает 1 кОм.

Анализ метрологических характеристик прототипа свидетельствует о том, что погрешность, обусловленная четырехзажимным подключением образцовой меры довольно высока и составляет 0,1%.

На устройстве в реальных условиях воздействует электростатические и электромагнитные поля (как внутренние, так и внешние), от которых у прототипа защиты нет. Источником внутренних электромагнитных полей является токовая цепь термометра сопротивления, а приемником - элементы входной цепи детектора равновесия. Поэтому незащищенность прототипа от внутренних и внешних электромагнитных полей снижает его помехоустойчивость.

В основу изобретения поставлена задача создания устройства для измерения температуры, в котором путем осуществления четырехзажимного подключения образцового резистора исключения шунтирующего влияния тока термометра сопротивления на регулируемую обмотку трансформатора, разделения токовых и потенциальных цепей термометра сопротивления, их отдельной эквипотенциальной защиты и бифилировки обеспечивают повышение точности и помехозащищенности измерений.

Поставленная задача достигается тем, что устройство для измерения температуры, содержащее первый трансформатор, первая первичная обмотка которого подключена к выходам генератора, первый из которых соединен с общей шиной, второй трансформатор, повторитель напряжения, образцовый резистор термометр сопротивления, подключенный первым и вторым потенциальными выводами соответственно к первому входу детектора равновесия непосредственно и к его второму входу через последовательно включенные первые вторичные обмотки первого и второго трансформаторов, а первым токовым выводом через вторую вторичную обмотку первого трансформатора к одному выводу в второй вторичной обмотки второго трансформатора, один вывод третьей регулируемой вторичной обмотки первого трансформатора подключен к общей шине, согласно изобретению снабжено вторым повторителем напряжения, образцовым резистором, включенным по четырехзажимной схеме, а первый и второй трансформаторы выполнены двухступенчатыми, первые ступени которых образованы соответственно первыми первичными и вторыми вторичными обмотками, а второе ступени - соответственно второй типичной, первой и третьей регулируемой вторичными обмотками, и второй первичными первой вторичной обмотками, при этом токовые выводы образцового резистора подключены к второму выходу генератора и другому выводу второй вторичной обмотки второго трансформатора, потенциальные выводы образцового резистора соединены между собой через последовательно включенные второй повторитель напряжения и вторую первичную обмотку первого трансформатора, второй токовый вывод термометра сопротивления и общие выходы повторителей напряжения подключены к общей шине, с которой соединены выходы первого и второго каналов первого повторителя напряжения через первую и вторую первичные обмотки второго трансформатора соответственно.

Первые и вторые вторичные обмотки трансформаторов и соединение между вторым выходом генератора и соответствующим токовым выводом термометра сопротивления выполнены экранированным проводом, а соединения между соответствующим токовым выводом образцового резистора, вторыми вторичными обмотками первых ступеней трансформаторов и соответствующим токовым выводом термометра сопротивления выполнены проводом с двойным экраном, внутренний экран которого соединен с соответствующими экранами проводов обмоток и общей шиной, внешние экраны проводов соединены между собой со стороны соответствующих обмоток, с экраном провода второго выхода генератора - со стороны образцового резистора и с соответствующим токовым выводом термометра сопротивления с его стороны причем экран провода второго выхода генератора подключен со стороны генератора к общей шине, соединения между вторым входом детектора равновесия, первыми вторичными обмотками вторых ступеней трансформаторов и соответствующим потенциальным выводом термометра сопротивления выполнены проводом с двойным экраном, внутренний экран которого соединен с соответствующими экранами проводов обмоток с их стороны, со стороны второго входа детектора равновесия - с его первым входом, а внешние экраны проводов соединены между собой со стороны соответствующих обмоток, с первым входом детектора равновесия - с его стороны и с соответствующим потенциальным выводом термометра сопротивления - с его стороны.

Введенная совокупность отличительных признаков позволяет получить новые свойства, благодаря которым достигается технический результат, заключающийся в повышении точности и помехоустойчивости. Введение двухступенчатых трансформаторов и наличие в них вторичных обмоток на первых и вторых ступенях позволяет разделить токовую и потенциальные цепи.

Вторичные обмотки первых ступеней первого и второго трансформаторов уменьшают синфазное напряжение на входе первого повторителя и трансформируют ток термометра сопротивления в первичные обмотки первых ступеней этих трансформаторов. Подключение первичных обмоток первых ступеней первого и второго трансформаторов к генератору и первому выходу второго повторителя соответственно позволяет замкнуть через них трансформируемые токи с соответствующих вторичных обмоток первых ступеней этих же трансформаторов. Тем самым исключается шунтирующее действие тока генератора сопротивления.

Подключение первичной обмотки второй ступени первого трансформатора к дополнительным зажимам через первый повторитель напряжения позволяет исключить шунтирование этой обмоткой резистора  $R_0$  и получить напряжение на вторичных обмотках этого же трансформатора строго пропорционально напряжению на образцовом резисторе.

Подключение первичной обмотки второй ступени второго трансформатора через второй выход второго повторителя к регулируемой обмотке второй ступени первого трансформатора позволяет разгрузить регулируемую обмотку от входного тока первичной обмотки второй ступени второго трансформатора и тока термометра сопротивления. Последовательное соединение потенциальных выводов термометра сопротивления и вторичных нерегулируемых обмоток вторых ступеней трансформаторов позволяет осуществить компенсацию как начального значения напряжения на термометре сопротивления, так и приращения напряжения на нем при изменении температуры исследуемой среды.

Введение двойного экранированного провода и соответствующее его соединение позволяет осуществить раздельное электростатическое и электромагнитное экранирование. Соединение первых экранов токовой цепи между собой и с общим проводом генератора позволяет получить нулевую разность потенциалов - между этим экраном и центральной жилой и тем самым осуществить эквипотенциальную защиту токовой цепи. Аналогично соединение первых экранов потенциальных цепей между собой и с общим проводом детектора равновесия позволяет получить на этом экране потенциал, равный потенциалу общего провода детектора равновесия и тем самым осуществить эквипотенциальную защиту потенциальной цепи.

Соединение вторых экранов токовой цепи между собой и со вторым токовым выводом термометра сопротивления, а также с общим проводом генератора позволяет осуществить возврат тока, протекающего через термометр сопротивления и тем самым уменьшить площадь токовой ветви, как антенны, излучающей электромагнитную помеху. При этом электромагнитные поля прямого тока, протекающего в токовой цепи и обратного тока, протекающего по экрану, взаимно компенсируются. То есть, отсутствует излучение от токовой цепи.

Соединение вторых экранов потенциальной цепи между собой, с потенциальным выводом термометра сопротивления и с общим проводом детектора равновесия позволяет минимизировать площадь потенциальной ветви как приемной антенны электромагнитной помехи, а также взаимно компенсировать токи, наведенные внешними магнитными полями в потенциальной цепи.

Указанная совокупность признаков отсутствует у прототипа. Наличие их в предлагаемом устройстве позволяет повысить точность и помехоустойчивость.

Техническая сущность и принцип действия предложенного устройства для измерения температуры поясняются чертежом, который раскрывает связи между элементами и принцип действия устройства в целом.

Предложенное устройство состоит из генератора 1, первого повторителя напряжения 2, первого ступенчатого трансформатора 3, который содержит первичную обмотку первой ступени 4, первичную обмотку второй ступени 5, вторичную обмотку первой ступени 6, вторичную регулируемую обмотку 7 и нерегулируемую обмотку 8 второй ступени, образцовый резистор 9, второй повторитель напряжения 10, второй ступенчатый трансформатор 11, содержащий первичные обмотки 12, 13 и вторичные обмотки 14, 15 первой и второй ступеней соответственно, термометр сопротивления 16, детектор равновесия 17, провод с одним экраном 18, первые экраны 19, 20 и вторые экраны 21, 22, 23, 24 двойных экранированных проводов. Параллельно зажимам генератора 1 подключена обмотка 4 и провод с одним экраном 18. Экран провода 18 подключен к общему зажиму генератора, куда также подключены общие провода повторителей напряжения 2 и 10 и внутренний экран 19 первого двойного экранированного провода. С другой стороны центральная жила провода 18 подключена к первому токовому зажиму образцового резистора 9, а экран к внешнему экрану 21 первого двойного экранированного провода. Первый потенциальный зажим образцового резистора 9 подключен к концу первой обмотки 5 второй ступени трансформатора 3. Второй потенциальный зажим образцового резистора 9 подключен ко входу повторителя 2, к выходу которого подключено начало обмотки 5. Второй токовый зажим образцового резистора 9 через двойной экранированный провод включен последовательно с обмоткой 14 трансформатора 11 и обмоткой 6 трансформатора 3. Конец обмотки 6 подключен к первому токовому зажиму термометра

сопротивления 16. Внешние экраны 21 и 22, 22 и 23, 24-25, 25 и 26 соединены попарно в непосредственной близости у выводов обмоток 14, 6, 8, 15 соответственно. Второй конец экрана 23 со стороны термометра сопротивления 16 подключен к его второму токовому зажиму. Второй конец экрана 26 со стороны детектора равновесия 17 подключен к его общему зажиму, куда также подключен второй конец внутреннего экрана 19. Вход детектора 17 через обмотки 15 и 8 подключен к первому потенциальному зажиму термометра сопротивления 16, второй потенциальный выход которого подключен к второму концу экрана 23. Первичные обмотки 12 и 13 трансформатора 11 подключены к соответствующим выходам повторителя 10, ко входу которого подключена регулируемая обмотка 7 трансформатора 3.

Предлагаемое устройство работает следующим образом. Под воздействием напряжения генератора  $U_r$  через образцовый резистор 9, обмотки 14 и 6, а также термометр сопротивления 16 протекает ток 1. Значение этого тока в общем случае будет зависеть от сопротивлений образцового резистора 9, термометра сопротивления 16, а также сопротивлений соединительных проводов и сопротивлений обмоток 14 и 6. Напряжение на обмотке 8 трансформатора 3 выбрано таким образом, чтобы при температуре, равной нулю  $^{\circ}\text{C}$  напряжение на входе детектора равновесия было равно нулю, при изменении температуры исследуемой среды изменяется и значение сопротивления термометра 16. На входе детектора равновесия 17 появится приращение напряжения, которое вызовет изменение кода  $N$  на его выходе. Под воздействием этого кода подвижной контакт обмотки 7 займет такое положение, при котором напряжение на обмотке 14 компенсирует изменение тока через термометр, а напряжение на обмотке 15 компенсирует приращение напряжения на входе детектора равновесия 17. Напряжение на обмотках 6 и 8 выбирают равным. Если напряжение на обмотках 14 и 15 также выбрать равным, то напряжение  $U_1$  на втором потенциальном зажиме образцового резистора, подключенного ко входу ПН2 в точке равновесия будет равно

$$U_1 = I \cdot R_n \quad (1)$$

напряжение  $U_5$  на первичной обмотке будет равно:

$$U_5 = U_r \left[ 1 - \frac{R_n}{R_0 + R_n} (1 - \delta_1) \right] \quad (2)$$

где  $\delta_1$  - погрешность коэффициента передачи первого повторителя. Напряжение на термометре сопротивления составит:

$$U_{Rt} = I \cdot R_t = \frac{U_r}{R_0 + R_n} \quad (3)$$

а уравнение равновесия можно представить в виде:

$$U_{Rt} = \frac{m_8}{m_5} U_5 + \frac{m_7}{m_5} \frac{m_{15}}{m_{13}} U_5 (1 + \delta_2) \quad (4)$$

Пусть измерение выполняется при помощи медного термометра с линейной функцией преобразования:

$$R_t = R_{t0} (1 + \alpha t)$$

Положим, что выполняются следующие условия:

$$\frac{m_8}{m_5} = \frac{R_{t0}}{R_0} \quad \text{и} \quad \frac{m_{15}}{m_{13}} \cdot \frac{R_0}{R_t} = \alpha$$

Тогда из 5 получим:

$$t = \frac{m_7}{m_8} \left( 1 + \delta_2 + \frac{R_n}{R_0} \delta_1 \right) - \frac{R_n}{R_{t0}} \delta_1 \frac{1}{\alpha} \quad (6)$$

Как видно из выражения (6) результат измерения отсчитывается по отношению чисел витков  $\frac{m_7}{m_8}$  и мало зависит от сопротивлений обмоток 6, 4 и подсоединительных проводов токовой цепи образцового резистора 9 и термометра 16. Физически это объясняется тем, что ток в цепи термометра 16 зависит от значения этого сопротивления, но от него также зависит и напряжения на вторичных обмотках 7 и 8. При изменении этого сопротивления пропорционально вменяется как ток, так и напряжение на обмотках 7 и 8, а результат измерения остается неизменным. Повторитель напряжения 2 исключается протекание тока намагничивания обмотки 5 через термометр сопротивления  $R_0$ .

Благодаря тому, что ток термометра сопротивления 16 проходит по вторичным обмоткам 6 и 14 первых ступеней трансформаторов 3 и 10 исключается шунтирование им обмоток вторых ступеней этих трансформаторов. Ток датчика, трансформируемый из обмотки 6 в обмотку 4, нагружает генератор 1. Ток, трансформируемый из обмотки 14 в обмотку 12, нагружает первый выход итерационного повторителя напряжения 10.

Рассмотрим теперь действие эквипотенциальной и электромагнитной защиты. Обмотки 6 и 8, 14 и 15 трансформаторов 3 и 11 соответственно выполнены экранированным проводом. Экраны 19 обмоток 6 и 14, соединены между собой последовательно и подключены к общему проводу генератора 1. Экраны 20 обмоток 8 и 15 также соединены между собой последовательно и подключены к общему проводу детектора равновесия 17, который в свою очередь связан с общим проводом генератора 1. Таким образом при переменном потенциале на центральном проводе обеспечивается нулевая разность потенциалов. Значит паразитные емкости не будут сказываться на работе как токовой цепи термометра, так и входной цепи детектора равновесия 17.

Ток термометра сопротивления 16 от генератора 1 проходит по центральной жиле провода 18 и центральным жилам соответствующих двойных экранированных проводов. Возврат этого тока осуществляется по внешним экранам 21, 22, 23. Электромагнитные поля, создаваемые прямым и обратным током, компенсируют друг друга. Следовательно, токовая цепь излучать ничего не будет. Далее, токи, наведенные от внешних электромагнитных полей на центральном проводе и вторых экранах входной цепи детектора равновесия 17 будут компенсировать друг друга. Поэтому на вход детектора равновесия 17 никакого паразитного сигнала поступать не будет. Кроме того, введение эквипотенциальной и электромагнитной защиты делает предлагаемое

устройство нечувствительным как к паразитным емкостям, так и к электромагнитным наводкам. За счет этого повышается помехоустойчивость.

Произведем оценку повышения точности в предлагаемом устройстве. Как видно из выражения (6) погрешность измерения температуры будет определяться погрешностью коэффициентов трансформации трансформаторов 3 и 10, а также погрешностью крутизны преобразования регулируемой обмотки. Так как трансформаторы являются ступенчатыми, то погрешность их коэффициентов трансформации  $\delta_1$  может составить менее  $1 \cdot 10^{-7}$  [5].

Погрешность крутизны преобразования регулируемой обмотки будет определяться в основном нелинейностью ее функции преобразования. В современных индуктивных делителях напряжения погрешность  $\delta_2$  от нелинейности функции преобразования может быть менее  $10^{-7}$ . Учитывая малость этих оставляющих погрешности в дальнейшем анализе ими пренебрежем и будем рассматривать лишь составляющие погрешности, обусловленной сопротивлением соединительных проводов и неидеальности повторителей напряжения.

Пусть первый повторитель выполнен по одноканальной сумме и имеет погрешность коэффициента передачи  $\delta = 10^{-4}$ , а второй повторитель выполнен по двухканальной схеме с погрешностью каждого канала  $10^{-4}$ . Такие повторители легко выполнить на базе современных операционных усилителей, имеющих коэффициент усиления  $(20-50) \cdot 10^3$ . Тогда, как показывают численные расчеты по уравнению (6) для термометра сопротивления с  $R_{t0}=100$  Ом, аддитивная составляющая погрешности измерения будет менее  $0,0002^\circ\text{C}$ , а мультипликативная составляющая менее  $10^{-7}$ . Таким образом погрешность измерения, обусловленная включением образцовой меры, уменьшается в тысячу - в десять тысяч раз. Заявляемое устройство находится на стадии разработки рабочей документации. Намечено его использование в 3-х глубоководных зондах, а также при разработке автоматической термометрической системы, позволяющей измерять температуру в диапазоне  $0-100^\circ\text{C}$  с приведенной погрешностью преобразователя  $0,0001^\circ\text{C}$ .

