

конодательная и прикладная метрология. 2011. № 3. С. 41–47.

8. **ГОСТ 860–75.** Олово. Технические условия.

9. **Guide** to the Realization of the ITS-90. Metal Fixed Points for Contact Thermometry. [Офици. сайт]: <https://www.bipm.org/utils/common/pdf/ITS-90/Guide-ITS-90-MetalFixedPoints-2015.pdf> (дата обращения: 10.01.2017).

10. **Strouse G. F., Moiseeva N. P.** Tin Freezing-Point Standard – SRM 741a. NIST Special Publication 260-138, June 1999.

11. **Fellmuth B., Hill K. D.** Estimating the influence of impurities on the freezing point of tin // Metrologia. 2006. V. 43. No. 1. P. 71–83.

12. **Zhang J. T., Rudtsch S., Fahr V.** The Influence of Antimony on the Tin Point // Intern. J. Thermophysics. 2008. V. 29. No. 1. P. 151–157.

13. **Fahr M., Rudtsch S.** Oxides in metal fixed points of the ITS-90 // Metrologia. 2009. V. 46. No. 5. P. 423–438.

14. **Fahr M., Rudtsch S., Aulich A.** Further Findings of Impurity Precipitation in Metal Fixed Points // Intern. J. Thermophysics. 2011. V. 32. No. 11–12. P. 2239–2251.

Дата принятия: 07.02. 2018.

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.317

Аппаратно-программный комплекс для измерения электрического сопротивления металлов и сплавов при высоких температурах

М. Ю. ЧЕРНОСКУТОВ, А. Д. ИВЛИЕВ, В. В. МЕШКОВ, А. О. САМОЙЛОВ, А. С. СОСНИН

Российский государственный профессионально-педагогический университет
Екатеринбург, Россия, e-mail: mikhail.chernskutov@gmail.com

Рассмотрен программно-аппаратный комплекс экспериментальной установки, предназначенной для измерения электрического сопротивления металлических проводников при высоких температурах. Предложены конструкции отдельных элементов, позволяющие обеспечить стабильную работу и высокую точность получаемых результатов измерений. Апробация комплекса выполнена на АРМКО-железе.

Ключевые слова: электрическое сопротивление, четырёхжжимный метод измерения, цифровая обработка информации.

Paper shows design of experimental software-hardware setup for measuring the electric resistance of metal conductors at high temperatures. The designs of separate elements, providing stable work and high accuracy of the measurements results are offered. Measurement of electrical resistance of iron ARMCO is conducted for testing purpose.

Key words: electrical resistance by four-probe measurement method, digital signal processing.

Измерения электрического сопротивления материалов имеют большое практическое значение. Несмотря на длительную историю развития и применения соответствующих методов, в настоящее время работы по совершенствованию процесса измерений активно продолжаются [1]. Значительный интерес, в частности, вызывает измерение электрического сопротивления хороших проводников при высоких температурах. Однако полезные сигналы при этом слишком малы, из-за чего влияние шумов и помех на результат измерений весьма существенно. Естественным выходом в сложившейся ситуации становится применение фильтрации сигналов, позволяющей ослабить вредное воздействие помех. Методы и средства цифровой обработки сигналов позволяют сравнительно простыми техническими средствами решить ряд задач, таких как увеличение точности и автоматизация процесса измерений [2].

В настоящей работе описана разработанная авторами конструкция установки (программно-аппаратного комплекса), предназначенной для измерения электрического сопротивления металлических проводников, находящихся в твёрдом состоянии, в диапазоне температур 300–2000 К.

Метод измерений. Общая схема установки. Хорошие проводники электричества – это металлы и сплавы. Для оценки их электропроводности были разработаны различные методы [3]. Например, методы, основанные на законе Ома, позволяют получить абсолютное значение электрического сопротивления, что делает эти методы более привлекательными. Однако при использовании данных методов возникает проблема обработки полезных сигналов, поскольку электрическое сопротивление соответствующих образцов невелико: обычно оно значительно меньше 1 Ом. Следовательно, сопротивление электрических контактов, по которым протекает электрический ток, имеет сопоставимое зна-

чение, что приводит к появлению напряжений помех, не меньших, а часто и больших, чем полезный сигнал. В этой ситуации становятся заметными и паразитные сигналы, возникающие из-за электрических наводок, шумов электрической цепи, контактной разности потенциалов, а при нагреве – и за счёт термоЭДС (явления Зеебека) [4]. Всё это резко снижает точность измерений. В подобной ситуации целесообразно применить фильтрацию полезного сигнала, а также компенсационные и корректирующие методы измерений [5].

При разработке измерительного комплекса авторы выбрали метод, основанный на законе Ома и получивший название четырёхзажимного (четырёхзондового, четырёхпроводного). Общая схема разработанной измерительной системы показана на рис. 1. К исследуемому образцу, имеющему сопротивление R , подключены четыре проводника. Два из них – токовые, через электронный коммутатор ЭК и эталонный резистор R_3 подсоединены к источнику тока с ЭДС E . К эталонному резистору R_3 также подключены четыре проводника, из которых два (токовых) – включены в основную электрическую цепь, а два других (потенциальные) служат для измерения напряжения U_3 на данном резисторе. Измерив это напряжение и сопротивление R_3 , можно по закону Ома вычислить силу тока I в цепи.

Металлические материалы при высоких температурах химически активны, поэтому исследуемый образец с сопротивлением R находится в вакуумной камере K , в которой имеется нагреватель (электрическая печь сопротивления), обеспечивающий нагрев образца до температуры 2000 К (на рис. 1 камера условно изображена пунктирной линией). Вакуумная система обеспечивает разряжение газа в камере до давления 10^{-3} Па. При необходимости в камеру закачивается благородный газ (гелий высокой чистоты), предотвращающий сублимацию образца. Температура образца измеряется с помощью термопары T по термоЭДС.

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) оценивает термоЭДС, а также напряжение сигнала U_c и эталонное напряжение U_3 . Напряжение U_c создаётся между потенциальными выводами на образце. Это напряжение складывается из полезного напряжения $U=RI$, обусловленного протеканием тока I в цепи, и напряжения помех U_n , связанного с действием отмеченных выше вредных факторов. Электронный коммутатор по команде микроконтроллера $МК$ периодически переключает направление электрического тока через образец на обратное. Изменение направления тока сказывается на знаке полезного напряжения, однако не влияет на помеховые составляющие. Поэтому в зависимости от положения коммутатора полезные сигналы U_{c1} , U_{c2} , регистрируемые АЦП (вольтметром), запишем как

$$\begin{aligned} U_{c1} &= U_1 + U_n; U_{c2} = -U_2 + U_n; U_1 = RI_1; \\ U_2 &= RI_2; I_1 = U_{31}/R_3; I_2 = U_{32}/R_3. \end{aligned} \quad (1)$$

В дальнейшем рассмотрим разность измеряемых напряжений: $U_{c1} - U_{c2} = U_1 + U_2$. Следовательно, электрическое сопротивление

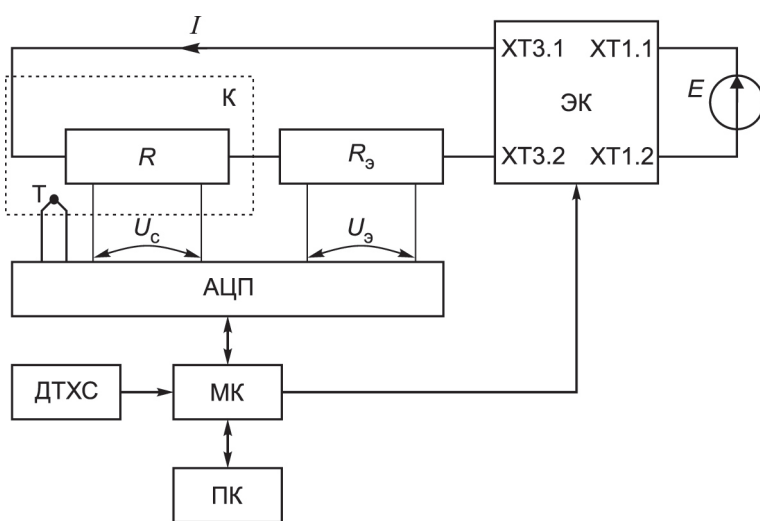


Рис. 1. Общая схема измерительной системы:
 T – термопара; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ДТХС – датчик температуры холодных спаев термопары; МК – микроконтроллер; ПК – персональный компьютер; ЭК – электронный коммутатор; K – камера.

ние R исследуемого образца на участке между потенциальными выводами можно вычислить по формуле

$$R = R_3(U_{c1} - U_{c2}) / (U_{31} + U_{32}). \quad (2)$$

Выражения (1), (2) записаны для случая, когда через цепи измерения напряжения (точнее – разности потенциалов) не протекают электрические токи. Иными словами, вольтметры должны обладать высоким входным сопротивлением либо иметь компенсационный принцип действия. Если образец имеет правильную геометрическую форму, то рассчитав электрическое сопротивление и линейные размеры образца, можно вычислить его удельное электрическое сопротивление [4].

Полезные сигналы, действующие в созданной установке, невелики, а напряжения помех являются случайными или псевдослучайными. Для борьбы с такими помехами эффективен метод фильтрации, который заключается в проведении многократных измерений и дальнейшем усреднении [6]. Данная процедура осуществляется в микроконтроллере, который решает ряд задач (см. рис. 1). Во-первых, он обрабатывает сигналы, передаваемые с АЦП, преобразует их из 24-разрядных чисел в значение в вольтах, производит фильтрацию и вычисляет значение электрического сопротивления. Рассчитанные данные форматируются в текстовый вид и передаются через интерфейс USB по протоколу виртуального последовательного порта в персональный компьютер ПК. Во-вторых, микроконтроллер формирует меню для пользователя. С помощью меню пользователь может произвести принудительную калибровку АЦП, включить коммутатор, а также запустить процесс измерений. Персональный компьютер выполняет две функции: интерфейса и хранилища. С точки зрения интерфейса – персональный компьютер принимает и отображает текстовые данные, формируемые микроконтроллером, и передаёт на микроконтроллер команды управления, сформированные пользователем. С точки зрения хранилища – программа-терми-

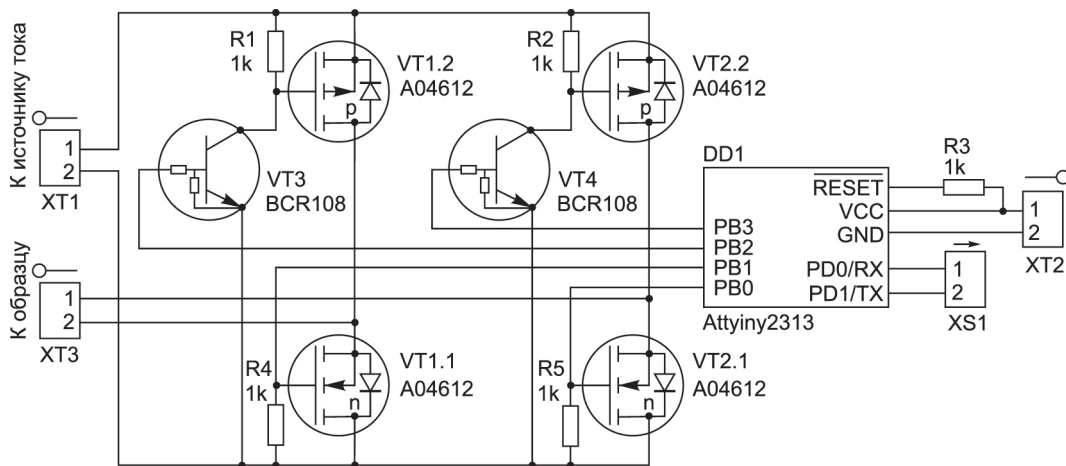


Рис. 2. Принципиальная схема коммутатора:

DD1 – контроллер коммутатора; XT1, XT2, XT3, XS1 – разъёмы; VT1.1, VT1.2, VT2.1, VT2.2 – комплементарные пары полевых транзисторов AO4612; VT3, VT4 – цифровые биполярные транзисторы со встроенными сопротивлениями BCR108; R1–R5 – сопротивления 1 кОм

нал сохраняет все переданные ей текстовые данные в файл для возможности дальнейшей обработки.

Аппаратная часть измерительного комплекса. Электронный коммутатор ЭК (см. рис. 1) является одним из важнейших элементов измерительной системы. От качества работы этого коммутатора в значительной степени зависит точность измерений. Среди наиболее значимых его показателей следует отметить коммутационные свойства и быстродействие. В качестве электронного коммутатора авторы разработали устройство Н-мост (рис. 2). Контакты XT1 подключены к источнику тока E , а контакты XT3 – к резисторам R (образцу) и R_s . Управление коммутатором производится сигналами, поступающими от микроконтроллера (см. рис. 1) на специальный контроллер DD1 коммутатора ATtiny2313A [7] через контакты XS1 (см. рис. 2). Задача микроконтроллера DD1 заключается в преобразовании параллельного кода от микроконтроллера в управляющие сигналы для ключей VT1, VT2. Формируемые при этом управляющие сигналы для транзисторов гарантируют невозможность их одновременного включения, что могло бы привести к короткому замыканию источника тока. Контакты XT2 являются питающими контактами микроконтроллера DD1.

Данное устройство способно коммутировать токи до 3 А посредством комплементарной пары полевых транзисторов AO4612 [8]. Падение напряжения на коммутирующих транзисторах при этом составляет не более 400 мВ, а рассеиваемая мощность не превышает 1,25 Вт на транзистор. Значения реальных токов при измерениях находятся в диапазоне 0,3–1 А, что соответствует рассеиваемой мощности порядка 130 мВт. Следовательно, дополнительно охлаждать транзисторы не надо.

Аналогово-цифровой преобразователь представляет собой входной элемент вольтметра, измеряющего напряжения на потенциальных выводах резисторов, а также термоЭДС термопары. Для этой цели авторы применяют АЦП AD7739 [9]. Заявленное эффективное разрешение 21 бит при частоте дискретизации 372 Гц приводит к погрешности единичного измерения, равной 2,3 мкВ. Авторы использовали эта-

лонный резистор R_s типа P310 сопротивлением 0,01 Ом и погрешностью $\pm 0,01\%$ [10]. В этих условиях погрешность измерений силы тока составляет 50 мкА.

Помимо процедуры переключения направления тока в измерительном контуре для уменьшения влияния паразитных ЭДС применяется встроенная в АЦП функция переключения дифференциальных входов мультиплексора (режим чоппинга, chopping mode), которая устраняет дрейф входного буфера АЦП [9]. Для устранения ошибок смещения и усиления (offset error and gain error) при из-

мерениях электрического напряжения АЦП имеет встроенную функцию калибровки. Данная система обеспечивает значение входного сопротивления на уровне 1 ГОм (на постоянном токе), что позволяет пренебречь потерями, которые возникают в измерительных цепях при оценке разностей потенциалов.

Канал измерения температуры образца. Рассматриваемая установка (см. рис. 1), как уже отмечалось, предназначена для измерения электрического сопротивления проводников в широком диапазоне температур. Поэтому, кроме описанных выше сигнальных цепей, имеется еще и термопарная цепь T оценки температуры образца. Данная цепь выполняется в различных вариантах. В частности, это может быть независимая термопара, изготовленная из вольфрам-рениевого сплава WP5/20. Её горячий спай располагается вблизи центральной точки образца. Но в тех случаях, когда кроме электрического сопротивления на данной установке исследуется и термоЭДС образца [1], термопары изготавливают в количестве двух штук, каждую из которых приваривают к образцу в качестве потенциального вывода. Тогда под температурой образца понимается среднее арифметическое значение показаний этих термопар. Ниже рассмотрим процесс измерения температуры образца с помощью независимой термопары, как показано на рис. 1.

Сигнал горячего спая термопары (термоЭДС) оценивается с помощью АЦП с погрешностью 2,3 мкВ. Холодные части термопары должны иметь температуру 0 °С, для чего их помещают в специальный термостат. Однако в случаях, когда точность измерения температуры не очень важна, измерительную цепь можно построить иначе. При этом достаточно измерить реальную температуру холодных частей термопары и затем добавить соответствующую ЭДС термопары к термоЭДС горячего спая [6]. Для измерения температуры холодных частей термопары используется датчик температуры холодного спая DTXC DS18B20, который расположен с наружной стороны вакуумной камеры в непосредственной близости к холодным частям термопары (см. рис. 1). Диапазон измерения температур с помощью этого датчика находится в пределах $-55 \dots 125$ °С. Погрешность измерения составляет $\pm 0,5$ °С в диапазоне температур $-10 \dots 85$ °С.

В качестве источника электрического тока через образец авторы задействовали лабораторный блок питания типа Mastech HY3002D-2. Значения силы тока устанавливали вручную. Уровень пульсации выходного напряжения, создаваемого этим блоком, согласно паспортным данным не превышает 0,5 мВ [11], что составляет меньше одной сотой процента. Оценка силы тока и напряжения на исследуемом образце происходит практически одновременно, поэтому влияние нестабильности работы блока питания не проявляется.

Управление и обработка данных. В качестве управляющего модуля применяется 8-разрядный микроконтроллер ATMEGA32u4 (см. рис. 1). Для тактирования микроконтроллера с целью увеличения количества операций с плавающей точкой в секунду был использован встроенный генератор с внешним кварцевым резонатором на 16 МГц. Для связи между АЦП и микроконтроллером существует шина SPI. По данной шине осуществляется настройка АЦП, передаются команды калибровки и запуска измерений, а также результаты аналого-цифрового преобразования. Для уменьшения влияния шумов программно усредняются данные за несколько измерений. Поскольку микросхема AD7739 не может одновременно преобразовывать несколько аналого-цифровых сигналов, то сигналы на схему АЦП поступают через встроенный аналоговый мультиплексор. При существующих трёх каналах время опроса одного канала не должно превышать 3 мс, чтобы была возможность синхронизировать процесс измерений на частоте 100 Гц (для уменьшения влияния помех промышленной частоты).

После запуска программы пользователем процесс измерений производится в цикле многократно, вплоть до ручной отмены этого процесса. Измерения происходят следующим образом: устанавливается прямое направление тока, затем наступает пауза, переходные процессы в системе заканчиваются, и вызывается подпрограмма измерений. Блок-схема подпрограммы приведена на рис. 3. В начале выполнения подпрограммы измерений устанавливается количество отсчётов N (степень фильтрации), определяющих время, в течение которого производится усреднение (обычно $N=16$). Однако это может быть любое другое чётное число, большее или равное двум. Данное число выбирается исходя из значения соотношения сигнал–помеха с учётом объёма свободной памяти микроконтроллера, обрабатывающего данные. Далее выбирается число каналов K . Для режима независимой термодары $K=3$. Цикл измерений повторяется N раз. Внутри цикла осуществляется ожидание синхронизации с частотой 100 Гц, вслед за этим данные с каждого из K каналов АЦП считываются и сохраняются в массив размером KN .

По завершению цикла измерений полученный массив обрабатывается в цикле усреднения. Для данных каждого j канала из числа каналов K массив полученных значений размером N из 24-разрядных чисел преобразуется в значения в вольтах, далее рассчитывается среднее арифметическое. Вслед за этим усреднённые данные передаются из подпрограммы в основной цикл. После этого направление тока меняется на противоположное, ожидается стабилизация тока, и вновь вызывается подпрограмма измерений. Усреднённые для двух направлений тока данные используются для расчёта электрического сопротивления и средней температуры.

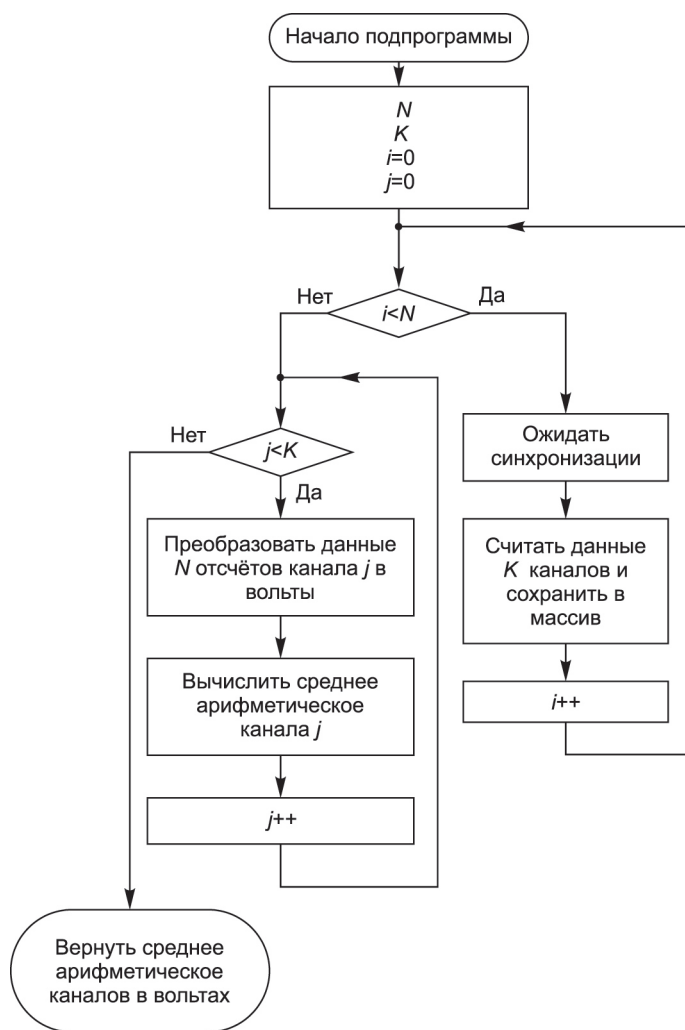


Рис. 3. Подпрограмма измерений

Итоговое время одного измерения зависит от степени фильтрации, т. е. размера выборки для фильтрации. При синхронизации с частотой 100 Гц время однократного измерения для всех каналов составляет 10 мс. При степени фильтрации, равной 16 отсчётам, время измерений увеличивается до 160 мс. Необходимость переключения направления тока увеличивает общее время получения информации, необходимой для расчёта электрического сопротивления, до 340 мс, что существенно меньше времени, затрачиваемого при ручном переключении.

Параметры системы и оценка погрешности. Созданная установка имеет следующие характеристики. Значения силы тока через образец можно установить в диапазоне 0,3–1,0 А. Минимальное электрическое сопротивление R исследуемого образца имеет значение $2 \cdot 10^{-4}$ Ом. В этом случае среднее квадратичное значение погрешности измерений электрического сопротивления не превышает 1,5 %. Для образцов, сопротивление которых превышает минимальное значение хотя бы вдвое, погрешность измерений электрического сопротивления снижается до 1 %. Приведённые выше цифры соответствуют времени усреднения сигнала, равного 160 мс. При необходимости это время можно

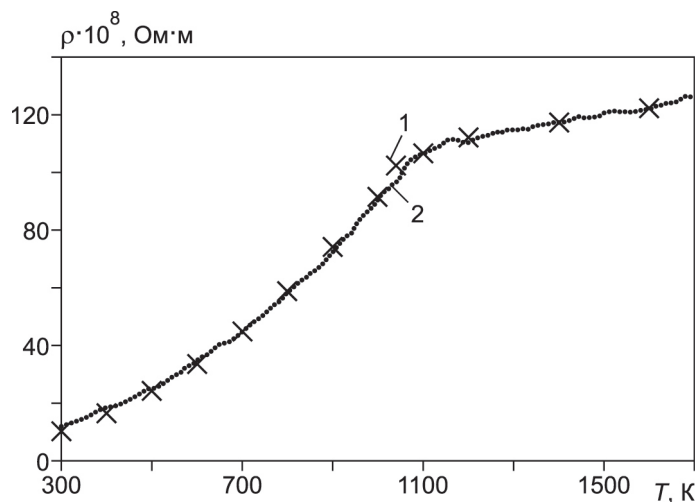


Рис. 4. Удельное электрическое сопротивление АРМКО-железа: 1 — справочные данные; 2 — экспериментальные данные

увеличить, что приведёт к снижению шумовой погрешности измерений. В случае, когда целью измерений является оценка удельного электрического сопротивления, необходимо учитывать ещё и погрешности определения размеров образца. Средняя температура образца, определяемая по независимой термопаре, имеет среднюю квадратичную погрешность, не превышающую 2 %.

Результаты испытаний. Проверку качества функционирования разработанных установки и метода определяли экспериментально по образцу технически чистого АРМКО-железа [12]. Для химически чистого железа имеются данные, которые приведены, в частности, в справочнике [13]. В проводимых экспериментах авторы оценивали удельное электрическое сопротивление, поэтому к «электрической» погрешности измерений, рассмотренной выше, добавилась ещё и погрешность оценки размеров образца. В результате общая погрешность измерений составила 3,0 % (среднее квадратичное значение).

На рис. 4 представлены экспериментальные и справочные данные. Расхождения, превышающие 5 %, соответствуют низкотемпературной области (300–500) К и точке Кюри (вблизи 1000 К). Расхождения объясняются тем, что в справочнике [14] представлены сведения об удельном электрическом сопротивлении чистого железа, содержащего меньшее количество примесей, чем АРМКО-железо. Именно поэтому в низкотемпературной области, где примесное рассеяние материалов ещё заметно, удельное электрическое сопротивление АРМКО-железа больше, чем чистого железа. В окрестности точки Кюри примеси «размывают» фазовый переход от ферромагнитного состояния к парамагнитному, и в материалах с большим количеством примесей фазовый переход протекает с меньшей аномалией. На графике температурной зависимости чистого железа эта аномалия сопровождается более резким увеличением электрического сопротивления.

Заключение. Разработана и создана экспериментальная установка для определения электрического сопротивления

твёрдофазных металлических проводников в диапазоне температур 300–2000 К. Оценка средней температуры образца производится с погрешностью не более 2 %. Метод измерений основан на законе Ома и представляет собой четырёхзажимную схему на постоянном электрическом токе. Использование цифровой обработки сигналов позволило снизить погрешность измерения до 1–1,5 % при условии, что измеряемое сопротивление превышает $2 \cdot 10^{-4}$ Ом. Применение цифровых методов позволило уменьшить время измерений за счёт исключения пользователя (оператора) из измерительного процесса. Контроль качества работы установки был проведён с помощью образца АРМКО-железа. Результаты исследования согласуются с литературными данными.

Подобного рода установки могут быть применены в научных и производственных лабораториях для проведения высокотемпературных измерений электрического сопротивления.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 11-08-00275 и № 14-08-00228).

Литература

1. Бурков А. Т., Федотов А. И., Касьянов А. А., Пантелеев Р. И., Накама Т. Методы и устройства измерения термоЭДС и электропроводности термоэлектрических материалов при высоких температурах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 2. С. 173–195.
2. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов. М.: Бинум-Пресс, 2006.
3. Крафтмахер Я. А. Введение в технику физического эксперимента. Ч. 1. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 1984.
4. Ивлиев А. Д. Физика. СПб.: Издательство «Лань», 2016.
5. Цветков Э. И. Методы электрических измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1990.
6. Денисенко В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. М.: Горячая линия–Телеком, 2009.
7. Микроконтроллер ATtiny2313. [Электрон. ресурс]: <http://www.atmel.com/images/doc8246.pdf> (дата обращения: 17.09.2017).
8. Комплементарная пара полевых транзисторов AO4612. [Электрон. ресурс]: <http://www.aosmd.com/pdfs/datasheet/AO4612.pdf> (дата обращения: 17.09.2017).
9. Аналого-цифровой преобразователь AD7739. [Электрон. ресурс]: <http://www.analog.com/media/en/technical/documentation/data-sheets/AD7739.pdf> (дата обращения: 17.09.2017).
10. ГОСТ 5.263–69. Катушки электрического сопротивления измерительные Р310, Р321 и Р331.
11. Лабораторный блок питания Mastech HY-3002D-2. [Электрон. ресурс]: <http://www.mastech.ru/catalog/power/hy3002d-2.html> (дата обращения: 18.09.2017).
12. ГОСТ 11036–75. Сталь сортовая электротехническая легированная. Технические условия.
13. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: Справочник. М.: Металлургия, 1989.

Дата принятия: 14.01.2018.