

УДК 006.91

*Пильцов Михаил Владимирович,*  
к.т.н., доцент кафедры «Промышленная электроника и информационно-измерительная техника» ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,

*e-mail: mpilcov@yandex.ru*

*Позднухов Алексей Александрович,*  
обучающийся группы ЭН-21-1 ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,

*e-mail: aleksejdragunov910@gmail.com*

## МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

*Piltsov M.V., Pozdnukhov A.A.*

## METHODS FOR MEASUREMENT OF ELECTRICAL RESISTANCE

**Аннотация.** Рассматриваются различные методы измерения активного электрического сопротивления, такие как метод вольтметра-амперметра, метод Кельвина и метод на основе моста Уитстона. Выделяются достоинства и недостатки данных методов. На основании одного из методов предложена структурная схема средства измерения малых электрических сопротивлений.

**Ключевые слова:** метод Кельвина, мост Уитстона, погрешность сопротивления соединительных проводов.

**Abstract.** The article discusses various methods for measuring active electrical resistance, such as the voltmeter-ammeter method, the Kelvin method and the Wheatstone bridge method. The advantages and disadvantages of these methods are highlighted. Based on one of the methods, a block diagram of a means for measuring low electrical resistances has been proposed.

**Keywords:** Kelvin method, Wheatstone bridge, resistance error of connecting wires.

Современный технологический процесс трудно представить без разнообразных датчиков температуры, давления, расхода и др., которые обеспечивают постоянство качества выпускаемой продукции [1]. Значения этих неэлектрических физических величин могут быть преобразованы в значения электрического сопротивления. Именно по этой причине измерение активного электрического сопротивления имеет большое значение.

Для измерения температур в широком диапазоне от минус 260 до плюс 1600 °С находят широкое применение терморезисторы, чье активное электрическое сопротивление зависит определенным образом от температуры [2]. Их изготавливают как из чистых металлов (медь, никель, платина), так и из полупроводников.

Если терморезистор нагревать проходящим через него постоянным током, то его температура, а, следовательно, и сопротивление, будут зависеть от теплообмена с окружающей средой. Теплообмен же зависит от таких физических свойств газовой или жидкой среды, как теплопроводность, плотность, вязкость и от скорости перемещения терморезистора относительно среды. Иными словами, терморезисторы находят применение

при измерении таких неэлектрических величин, как скорость, расход, плотность и др.

К достоинствам терморезисторов из чистых металлов можно отнести: линейную зависимость сопротивления от температуры; широкий диапазон измеряемых температур, что достигается подбором металла с нужными характеристиками. Главным недостатком таких терморезисторов является низкое значение температурного коэффициента сопротивления, у большинства чистых металлов при изменении температуры на 1 °С сопротивление изменяется на 0,4 – 0,65 %. К тому же такие терморезисторы имеют небольшое значение номинального сопротивления, порядка сотен Ом.

К достоинствам терморезисторов из полупроводниковых материалов следует отнести большое значение температурного коэффициента сопротивления и возможность изготавливать их с номинальными сопротивлениями порядка сотен кОм. Однако из-за выбранного материала такие терморезисторы очень ограничены в диапазоне измеряемых температур, имеют явно выраженную нелинейную зависимость сопротивления от температуры и требуют индивидуальной гра-

дуировки.

Для измерения таких неэлектрических величин, как давление, вибрация, ускорение находят применение тензометрические датчики, называемые также тензорезисторами [3]. При механической деформации происходит изменение активного электрического сопротивления материала тензорезистора из-за изменений его геометрических размеров (длины и площади сечения), а также из-за изменения удельного сопротивления самого материала.

Тензометрические датчики изготавливают из сплавов металлов, а также из полупроводников [4]. Конструктивно их выполняют в виде проволоки, фольги или пленки, тем или иным способом закрепляемой на гибкой диэлектрической подложке, через которую деформация детали вызывает деформацию самих датчиков, что выливается в изменение их активного электрического сопротивления. Типовые значения сопротивлений данных датчиков (из сплавов металлов) лежат в диапазоне от 5 до 1000 Ом.

Серьезные ограничения по температурному диапазону и существенная нелинейность зависимости сопротивления от температуры у полупроводниковых материалов не позволяет отказаться от датчиков из чистых металлов или их сплавов, из-за чего возникает необходимость измерять малые значения сопротивлений.

На рисунке 1 приведен пример измерения омметром сопротивлений двух терморезисторов.

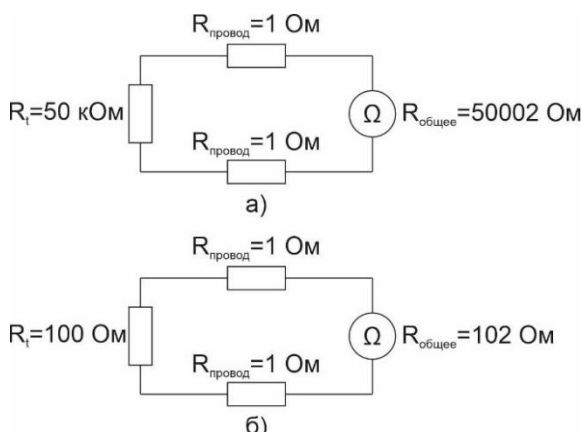


Рисунок 1 – Схемы измерения сопротивлений: а) полупроводникового термистора; б) металлического термометра сопротивления

Из рисунка видно, что к измеряемому значению сопротивления терморезистора до-

бавляется сопротивление соединительных проводов, прямого и обратного. При этом, если сопротивление терморезистора велико (рисунок 1, а), то погрешность от сопротивления проводов составляет 0,004 % и ей можно пренебречь. В случае терморезистора из металла (рисунок 2, б) эта погрешность составит уже 1,96 %, что может быть существенным. А так, как большое число датчиков имеют небольшие значения типового сопротивления, возникает необходимость в разработке методов измерения как больших, так и малых сопротивлений.

Наиболее простым в реализации методом измерения сопротивлений является метод амперметра-вольтметра. Он заключается в том, что сопротивление вычисляют косвенно, через формулу закона Ома, а ток и напряжение, необходимые для этих вычислений определяют методом прямых измерений. Схемы, реализующие метод амперметра-вольтметра для малых и больших сопротивлений, приведены на рисунке 2.

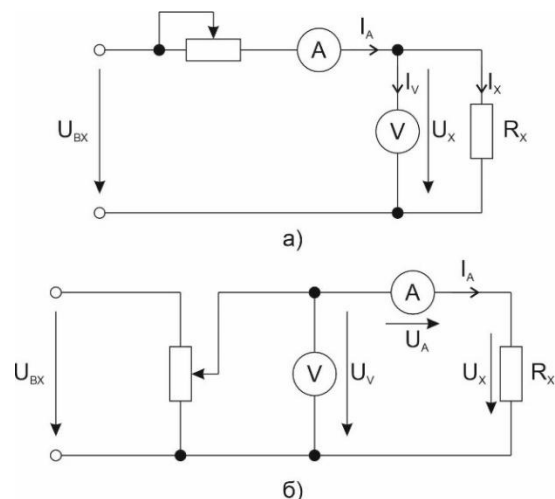


Рисунок 2 – Схемы измерения сопротивлений методом амперметра-вольтметра: а) для измерения малых сопротивлений; б) для измерения больших сопротивлений

В схеме для измерения малых сопротивлений (рисунок 2, а) предполагается, что амперметр измеряет ток через измеряемое сопротивление  $R_x$ . При этом очевидно, что амперметр измеряет сумму токов через вольтметр и  $R_x$ . Соответственно, схема будет тем точнее, чем меньше ток будет протекать через вольтметр, чье внутреннее сопротивление велико, но имеет конечное значение. Подобное будет иметь место, когда измеряемое сопротивление  $R_x$  будет существенно мень-

ше внутреннего сопротивления вольтметра. Иными словами, измерять подобной схемой сопротивления, сопоставимые с внутренним сопротивлением вольтметра, нельзя из-за возникающей большой погрешности.

В схеме для измерения больших сопротивлений (рисунок 2, б) предполагается, что вольтметр измеряет напряжение на сопротивлении  $R_x$ . При этом очевидно, что вольтметр измеряет суммарное напряжение на амперметре и  $R_x$ . Соответственно, схема будет тем точнее, чем меньше напряжение будет падать на амперметре. Это будет иметь место, когда сопротивление  $R_x$  будет существенно больше внутреннего сопротивления амперметра, которое невелико, но не равно нулю. Таким образом, измерять при помощи данной схемы сопротивления, сопоставимые с внутренним сопротивлением амперметра, нельзя.

Метод амперметра-вольтметра имеет ряд недостатков. Он требует наличие двух средств измерений: вольтметра и амперметра. При измерении всегда присутствует методическая погрешность, вызванная внутренними сопротивлениями используемых средств измерений, при этом метод никак не учитывает влияние сопротивления соединительных проводов.

Одним из наиболее точных методов измерения электрического сопротивления является метод моста Уитстона. Схема подобного моста приведена на рисунке 3.

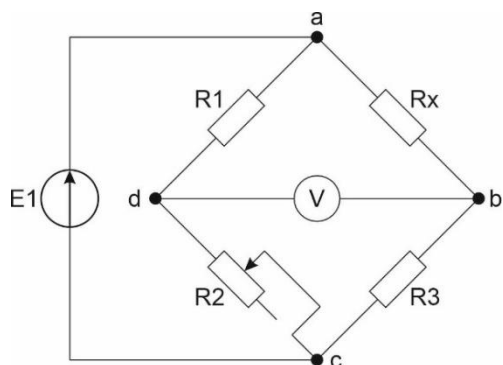


Рисунок 3 – Схема моста Уитстона

Измерительный мост включает в себя четыре резистора. Резисторы  $R1$  и  $R3$  имеют постоянные и заранее известные сопротивления. Переменный резистор  $R2$  используется для так называемой балансировки моста.  $R_x$  представляет из себя резистор, чье сопротивление нужно измерить. При этом в одну диагональ моста «а-с» включают источник по-

стоянного напряжения, а в другую диагональ «d-b» вольтметр.

Балансируют мост следующим образом: путем изменения переменного сопротивления  $R2$  добиваются того, чтобы вольтметр показал отсутствие напряжения между точками «d» и «b». После этого начинает работать простое соотношение: произведение сопротивления  $R1$  на сопротивление  $R3$ , равно произведению сопротивления  $R2$  на сопротивление  $R_x$  [5,6]. Из данного соотношения найти искомое значение сопротивления  $R_x$  не представляет особой сложности.

Схема моста, приведенная на рисунке 3, не учитывает сопротивления соединительных проводов. Однако на практике находят применение схема так называемого двойного измерительного моста, которая учитывает сопротивление соединительных проводов и пригодна для измерения сопротивлений в области микроом.

Рассмотренный выше метод обладает существенным недостатком, который заключается в технической сложности изготовления средства измерения, в основу которого он будет положен. Подобный метод требует прецизионных сопротивлений  $R1$  и  $R3$ . Переменное сопротивление  $R2$  также должно определяться с очень высокой точностью. Особую сложность представляет балансировка моста, так как попытка автоматизировать ручную балансировку вызывает необходимость применять различные электродвигатели, точность поворота вала которых будет позволять не проскакивать момент отсутствия напряжения на диагонали «d-b».

Широкое применение на практике находит так называемая четырехпроводная схема для измерения сопротивлений, называемая также схемой Кельвина. Данная схема приведена на рисунке 4.

Рассмотрим работу подобной схемы. К измеряемому сопротивлению  $R_x$  посредством двух пар проводов подключают источник постоянного тока и вольтметр. При этом ток источника проходит только через свои соединительные провода и сам резистор. Ток в проводах с вольтметром отсутствует из-за высокого сопротивления последнего. При этом ток источника тока устанавливается заранее и не зависит от сопротивления  $R_x$ , которое должно быть в определенных пределах. Таким образом, зная ток источника тока и показания вольтметра можно определить сопротивление косвенным методом через за-

кон Ома. При этом сопротивления соединительных проводов не оказывает влияния на результат измерения из-за отсутствия тока, а, следовательно, и падения напряжения на соединительных проводах вольтметра, что позволяет измерять при помощи данного метода малые сопротивления.

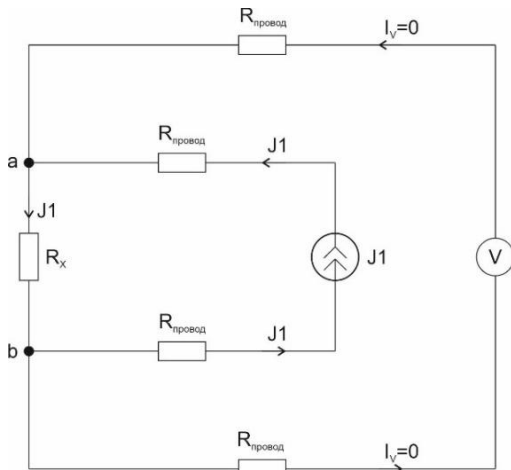


Рисунок 4 – Измерительная схема по методу Кельвина

К недостаткам подобной схемы измерений следует отнести большое число соединительных проводов, а также определенные ограничения на их длину, связанные с мощностью источника тока. Определенным компромиссом является трехпроводная схема, в которой применяется на один соединительный провод меньше, но возрастают требования к идентичности сопротивлений соединительных проводов.

Анализируя вышесказанное, можно сделать вывод о том, что метод Кельвина лучше подходит для реализации на его основе средства измерения малых сопротивлений с применением современной электронной элементной базы. На рисунке 5 приведена примерная структурная схема такого средства измерений.

Как было сказано выше, для четырехпроводной схемы требуется источник постоянного тока. Его можно реализовать при помощи операционного усилителя, чей стабильный слабый выходной ток будет увеличиваться усилителем тока на транзисторном каскаде. При этом операционный усилитель и транзисторный усилительный каскад будут получать энергию от источника опорного напряжения, в качестве которого может выступить

пять компенсационный стабилизатор.

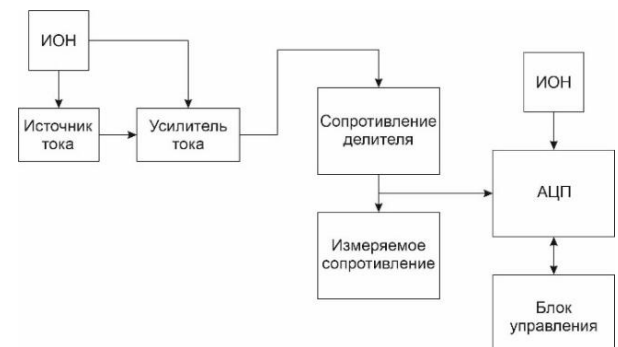


Рисунок 5 – Структурная схема средства измерения малых сопротивлений

Ток от усилителя тока протекает через два последовательно соединенных сопротивления, которые образуют делитель напряжения. Одно сопротивление является искомым, другое опорным. При помощи аналого-цифрового преобразователя происходит измерение напряжения на искомом сопротивлении. При этом предполагается, что ток от усилителя тока заранее известен. После этого блок управления на основании закона Ома вычисляет значение искомого сопротивления. Для корректной работы блоку АЦП требуется свой источник опорного напряжения, который должен иметь большую стабильность, чем ИОН, питающий источник и усилитель тока.

Вдобавок путем изменения сопротивления делителя можно изменять диапазоны измерения сопротивлений.

Средство измерения, которое будет реализовано на основе структурной схемы, приведенной на рисунке 5, может быть применено для измерения:

- малых сопротивлений датчиков температуры из чистых металлов;
- сопротивлений тензодатчиков;
- сопротивлений измерительных шунтов, применяемых в стрелочных амперметрах.

Дальнейшим развитием структурной схемы на рисунке 5 будет внедрение возможности автоматической калибровки тока, протекающего через измеряемое сопротивление. Подобное можно реализовать при помощи уже имеющегося в составе схемы аналого-цифрового преобразователя.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Квартин М.И.** Электромеханические и магнитные устройства автоматики / М. И. Квартин. – М.: Издательство «Высшая школа», 1979. – 352 с.
2. **Шефтель, И.Т.** Терморезисторы / И. Т. Шефтель. – М.: Издательство «Наука», 1973. – 416 с.
3. **Пучкин, Б.И.** Приклеиваемые тензодатчики сопротивления / Б. И. Пучкин. – М.: Издательство «Энергия», 1966. – 88 с.
4. **Клокова, Н.П.** Тензорезисторы: Теория, методики расчета, разработки / Н. П. Клокова. – М.: Издательство «Машиностроение», 1990. – 224 с.
5. **Бессонов, Л.А.** Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1996. – 566 с.
6. **Пантюшин, В.С.** Общая электротехника: учебное пособие / В. С. Пантюшин. – М.: Высшая школа, 1970. – 568 с.

УДК 681.544

**Чистофорова Наталья Васильевна**,  
к.т.н., доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств»,  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,  
e-mail: ryabinak@mail.ru  
**Зубков Никита Вячеславович**,  
магистрант кафедры «Автоматизация технологических процессов»,  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,  
e-mail: zubkovn9823@rambler.ru

### АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

Chistoforova N.V., Zubkov N.V.

#### AUTOMATION OF THE PROCESS OF SURFACTANTS MANUFACTURE

**Аннотация.** Приведен технологический регламент производства поверхностно-активного вещества. Предложены решения по автоматизации установки.

**Ключевые слова:** автоматизация, программный комплекс, поверхностно-активное вещество, получение алкилбензолсульфоната натрия.

**Annotation.** The technological regulations for the production of surfactant are given. Solutions for plant automation are proposed.

**Keywords.** automation, software package, surfactant, production of sodium alkylbenzenesulfonate.

Автоматизация производства является одним из решающих факторов ускорения научно-технического прогресса, вызывает подлинно революционные преобразования в материальном производстве, требует перестройки, а то и полного изменения технологических процессов.

Во всех отраслях промышленного производства автоматизация обеспечивает не только возрастание производительности труда, улучшение качества изделий и продуктов, повышение безопасности производства, но и позволяет осуществлять новые высокоинтенсивные процессы, недоступные ранее для управления человеком, создавать неизвестные природе новые эффективные материалы, вещества и т.д.

При оценке состояния и перспектив ав-

томатизации производства нельзя ограничиваться характеристикой только систем автоматического управления и технических средств автоматики. Автоматизация должна рассматриваться в широком аспекте взаимосвязанных проблем технологии, организации и экономики производства, систем и средств управления. На динамику развития автоматизации оказывает влияние большое число случайных факторов: состояние и подготовленность к автоматизации процессов технологии и оборудования, качество и стабильность сырья, продуктов и энергетических ресурсов, квалификация кадров, организация деятельности коллективов рабочих и специалистов.

Автоматизация производства (основного и вспомогательного) связана не только с