

# ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА ПО ЗАКОНУ ОМА

## CURRENT MEASUREMENT ACCURACY: THE COURT OF OHMS LAW

В ходе определения энергоэффективности устройства и анализа тока, потребляемого от батарей, выполняются измерения тока и напряжения, и на их основе рассчитывается мощность и другие электрические характеристики. Точность такого анализа непосредственно зависит от точности составляющих измерений, и в большинстве случаев суммарная погрешность не должна превышать 0,1%. На первый взгляд может показаться, что для измерения тока нужно просто использовать закон Ома. Однако измерение больших или быстро изменяющихся токов в реальных условиях может оказаться достаточно сложным из-за ограничений по диапазону измерений и точности.

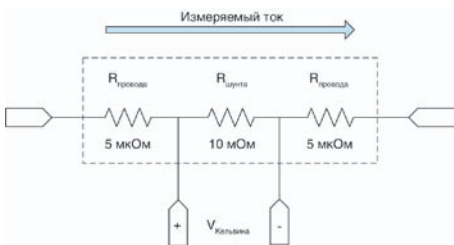


Рис. 1. Шунт, подключенный по схеме Кельвина

Цифровые мультиметры могут иметь превосходную точность измерения тока, но большинство этих приборов не может измерять ток более 10 А. Внешние токовые пробники предлагают обычно умеренную точность в диапазоне от 0,5 до 1%. И хотя такими пробниками удобно пользоваться, они подвержены кратковременному дрейфу и должны периодически вручную выставляться на ноль. В результате, для измерения токов в десятки или сотни ампер инженерам приходится создавать специальные измерительные решения на основе шунтов. К сожалению, создавая специализированные измерительные решения, вы сталкиваетесь с множеством потенциальных источников погрешности и не можете быть уверенными в конечной точности без существенных затрат на внешнюю проверку результатов.

### ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПОГРЕШНОСТЬ

Прецизионный шунт должен иметь отклонение от номинального сопротивления 0,5% или 0,1%. Но без дополнительного измерения даже дорогостоящий шунт с отклонением 0,1% поглотит весь бюджет погрешности еще до учета других источников ошибок. Поскольку абсолютное значение сопротивления регулировать нельзя и оно зависит от температуры, конечный пользователь не может выполнить калибровку, и вы вынуждены прибегнуть к измерению сопротивления.



### Agilent Technologies

рить шунт со значением сопротивления в несколько мОм из-за недостаточного разрешения на малых сопротивлениях.

Один из способов измерения сопротивления шунта заключается в последовательном включении его с заведомо известным шунтом и пропускании через эту цепь тока от программируемого источника питания. Используя известный шунт для измерения тока, вы можете измерить падение напряжения на неизвестном шунте и вычислить его сопротивление. Для регистрации изменений сопротивления, связанных с температурой, нужно дожидаться достижения шунтами теплового равновесия. Этот процесс отнимает много времени, причем для учета саморазогрева, влияние которого повышается с ростом тока, замеры нужно выполнять, повышая ток равными шагами до максимального допустимого значения.

Если сопротивление шунта равно не-

скольким мОм, то следует учитывать и сопротивление соединительных проводов. Для шунта сопротивлением 10 мОм, даже 10 мкОм дополнительного сопротивления проводов дадут погрешность 0,1%. Специально изготовленный шунт с 4-проводным подключением по схеме Кельвина (рис. 1) позволяет предотвратить влияние сопротивления проводов на номинал шунта и на результаты измерений.

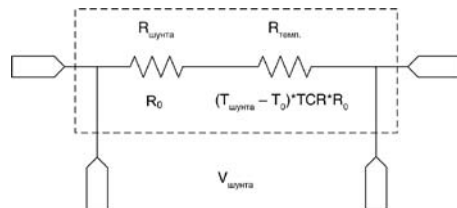


Рис. 2. Тепловой дрейф сопротивления шунта

С изменением температуры сопротивление всех резисторов немного меняется (рис. 2). В первом приближении этот эффект можно описать температурным коэффициентом сопротивления (ТКС),

**Закон Ома** — физический закон, определяющий связь электродвижущей силы источника или электрического напряжения с силой тока и сопротивлением проводника. Экспериментально установлен в 1826 году и назван в честь его первооткрывателя Георга Ома.

В своей оригинальной форме он был записан его автором в виде:  $X = a / (b + I)$ . Здесь  $X$  — показания гальванометра, т.е. в современных обозначениях сила тока  $I$ ,  $a$  — величина, характеризующая свойства источника тока, постоянная в широких пределах и независимая от величины тока, то есть в современной терминологии электродвижущая сила (ЭДС)  $\varepsilon$ ,  $b$  — величина, определяемая длиной соединяющих проводов, чему в современных представлениях соответствует сопротивление внешней цепи  $R$  и, наконец,  $a$  — параметр, характеризующий свойства всей установки, в котором сейчас можно усмотреть учёт внутреннего сопротивления источника тока  $r$ . В таком случае в современных терминах, и в соответствии с предложенной автором записью, формулировка Ома выражает закон Ома для полной цепи:  $I = \varepsilon / (R + r)$ , где:  $\varepsilon$  — ЭДС источника напряжения (В),  $I$  — сила тока в цепи (А),  $R$  — сопротивление всех внешних элементов цепи (Ом),  $r$  — внутреннее сопротивление источника напряжения (Ом).

Из закона Ома для полной цепи вытекают следствия:

- при  $r \ll R$  сила тока в цепи обратно пропорциональна её сопротивлению. А сам источник в ряде случаев может быть назван источником напряжения;
- при  $r \gg R$  сила тока от свойств внешней цепи (от величины нагрузки) не зависит, и источник может быть назван источником тока.

Часто выражение  $U = IR$  (где  $U$  есть напряжение или падение напряжения или, что то же, разность потенциалов между началом и концом участка проводника) тоже называют «законом Ома».

Таким образом, электродвижущая сила в замкнутой цепи, по которой течёт ток, равняется:  $\varepsilon = Ir + IR = U(r) + U(R)$ .

То есть сумма падений напряжения на внутреннем сопротивлении источника тока и на внешней цепи равна ЭДС источника. Последний член в этом равенстве специалисты называют «напряжением на зажимах», поскольку именно его показывает вольтметр, измеряющий напряжение источника между началом и концом присоединённой к нему замкнутой цепи. В таком случае оно всегда меньше ЭДС.

К другой записи формулы закона Ома, а именно  $I = U/R$ , применима другая формулировка: сила тока в участке цепи прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна электрическому сопротивлению данного участка цепи.

Выражение выше можно переписать в виде  $I = UG$ , где коэффициент пропорциональности  $G$  — проводимость или электропроводность. Изначально единицей измерения проводимости был «обратный Ом» — Мо, впоследствии переименованный в Сименс (обозначение: См, S).

Источник: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

который измеряется обычно в миллионных долях на градус Цельсия (см. уравнение 1). Электротехническая медь имеет ТКС примерно  $4000 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ . В прецизионных шунтах используются специальные сплавы с минимальным ТКС, достигающим значения  $10 \times 10^{-6}$  и лучше. Тем не менее, ТКС никогда не равен нулю, поэтому, чтобы изменения температуры окружающей среды или саморазогрев не снизили точность измерения, нужно всегда учитывать их влияние, особенно когда на шунте рассеивается мощность в несколько ватт. При подъеме температуры на

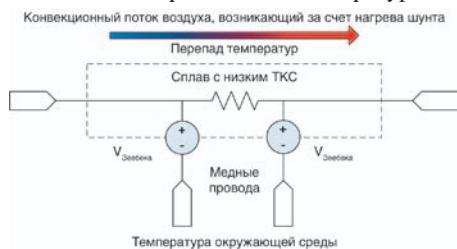


Рис. 3. Перепад температуры, вызванный саморазогревом шунта

$40^\circ\text{C}$  резистор с ТКС  $25 \times 10^{-6}$  даст погрешность 0,1%. Кроме того, поскольку сопротивление меняется с изменением температуры, напряжение на шунте установится не сразу вслед за скачком тока, а будет дрейфовать, пока сопротивление шунта не достигнет теплового равновесия. Тепловая постоянная времени зависит от формы, массы и теплопроводности материала шунта. Для физически больших устройств она может достигать одной минуты и оказывать существенное влияние на скорость измерений.

Уравнение 1:  $R_{\text{общее}} = R_0 \cdot (1 + (T - T_0) \cdot \text{TCR})$ .

И хотя хороший цифровой вольтметр может измерять микровольты, основной вклад в общую точность шунта при малых уровнях сигнала дает погрешность смещения. Эти факторы определяют

Прецизионный шунт — это устройство, которое позволяет электрическому току протекать в обход какого-либо участка схемы, обычно представляет собой низкоомный резистор, катушку или проводник.

Шунты применяются для изменения верхнего предела измерения у амперметров магнитно-электрической системы. При этом необходимое сопротивление шунта рассчитывают по формуле:  $R_2 = R_1 I_1 / (I - I_1)$ , где:  $R_2$  — сопротивление шунта,  $R_1$  — сопротивление амперметра,  $I$  — максимальный ток, который будет соответствовать полному отклонению стрелки прибора,  $I_1$  — номинальный максимальный ток, измеряемый амперметром без шунта.

Источник: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

нижний предел сопротивления шунта, при котором смещение оказывается незначительным по сравнению с ожидаемым уровнем сигнала. Погрешность измерения напряжения цифровым вольтметром включает фиксированный «процент от диапазона» (смещение, равное обычно нескольким микровольтам), а также температурную зависимость.

Распространенным источником смещения в измерениях с токовыми шунта-

нужно тщательно подбирать материалы и следить за тем, чтобы вся система находилась при одинаковой температуре. Следовательно, нужно учитывать источники тепла, которые могут вызвать перепад температур, такие как поток воздуха от вентилятора охлаждения и мощность, рассеиваемую самим шунтом. Контакты разъемов со специальным покрытием, контакт-детали реле и даже подключенные к шунту медные провода (рис. 3) могут об-

Температурный коэффициент электрического сопротивления (ТКС) — величина, равная относительному изменению электрического сопротивления участка электрической цепи или удельного сопротивления вещества при изменении температуры на единицу:  $\alpha = 1/R \cdot dR/dT$ , где  $R$  — сопротивление вещества при температуре  $T$ . Температурный коэффициент сопротивления характеризует зависимость электрического сопротивления от температуры и измеряется в кельвинах в минус первой степени ( $\text{K}^{-1}$ ).

Источник: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

ми является термоэлектрический эффект Зеебека, используемый в термопарах для измерения температуры. Он проявляется тогда, когда цепь, состоящая из двух разных металлов, имеет различную температуру на разных участках. Значение напряжения Зеебека зависит от контактирующих металлов и от разности температур и составляет обычно несколько микровольт на градус Цельсия. Для минимизации термоэлектрического эффекта

разовывать нежелательные термопары и влиять на измерение температурно-зависимыми напряжениями смещения. Смещение 10 мкВ (например, напряжение Зеебека  $3,33 \text{ мкВ}/^\circ\text{C} \times 3^\circ\text{C}$ ) создает погрешность 0,1% для сигнала 10 мВ.

### ВЫБОР ШУНТА

Правильное измерение тока начинается с хорошего шунта. Такие негативные факторы, как разброс параметров, сопротивление проводов и большой ТКС, не позволяют применять в качестве шунта обычный резистор. Кроме того, противоречивые требования к измерениям больших и малых токов ограничивают максимальное и минимальное сопротивление шунта в реальных системах.

При измерении больших токов верхняя граница сопротивления шунта определяется допустимым уровнем рассеиваемой мощности. Поскольку рассеиваемая мощность описывается уравнением  $P_D = I^2 \cdot R$ , при токе 100 А на резисторе 1 мОм рассеивается мощность 10 Вт при сравнительно небольшом падении напряжения 100 мВ. При 10 Вт рассеиваемой мощности изменение сопротивления шунта из-за ТКС, вероятно, будет значительным и потребует либо теплоотвода, либо больших физических размеров для ограничения роста температуры.

Другой практический верхний предел сопротивления шунта определяется падением напряжения на нем. Напряжение на шунте вычитается из напряжения источника питания, поступающего на тестируемое устройство. Подключив вы-

Суммарная погрешность измерения складывается под влиянием совокупности всех действующих факторов, в том числе внешних.

Влияние каждого фактора может исследоваться отдельно, но удобно для исследования и оценки погрешностей делить суммарную погрешность на две составляющие: случайную и систематическую, принципиально отличающиеся по характеру проявления и требующие применения различных способов для их обнаружения, оценки и учета.

Случайная погрешность — составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) в серии повторных измерений одного и того же размера физической величины, проведенных с одинаковой тщательностью в одних и тех же условиях. В появлениях таких погрешностей не наблюдается какой-либо закономерности, они обнаруживаются при повторных измерениях одной и той же величины в виде некоторого разброса получаемых результатов. Случайные погрешности неизбежны, неустранимы и всегда присутствуют в результатах измерений.

Систематическая погрешность — составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно меняющаяся при повторных измерениях одной и той же физической величины. Систематическая погрешность, как правило, не изменяется при многократных измерениях и может быть почти полностью устранена путем обнаружения и устранения причины, по которой она возникла, или путем введения поправки.

В процессе измерения оба вида погрешностей проявляются одновременно, и погрешность измерения можно представить в виде суммы:  $\Delta = \delta + \theta$ , где  $\delta$  — случайная погрешность,  $\theta$  — систематическая погрешность.

Источник: [www.support17.com](http://www.support17.com), [www.allbest.ru](http://www.allbest.ru)

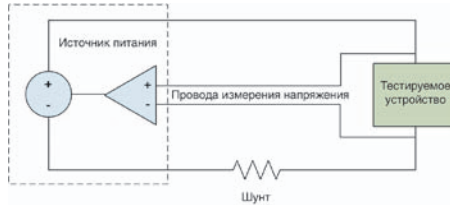
носной датчик источника питания после шунта, можно скомпенсировать падение напряжения на стабилном сопротивлении шунта (рис. 4). Однако при резком скачке тока на шунте возникнет скачок напряжения,  $\Delta V = \Delta I \cdot R$ , который будет скомпенсирован источником питания за некоторое время. Скачок напряжения на шунте в дополнение к собственному переходному процессу источника питания могут вызвать перезагрузку тестируемого устройства или иное нарушение его работы.

При малом токе уравнение  $V = I \cdot R$  показывает, что для создания достаточно большого падения напряжения, необходимого для достижения высокой точности измерения, необходим шунт с большим сопротивлением. В системе с одним шунтом, которая используется для измерения и малых, и больших токов, максимальное сопротивление шунта уже ограничено рассеиваемой мощностью и падением напряжения на шунте. Следовательно, максимальное допустимое значение сопротивления однозначно определяет минимальную точность измерения тока, при которой погрешность цифрового вольтметра и смещение Зеебека становятся неприемлемыми.

Может возникнуть соблазн использовать второй шунт с переключателем для создания большего падения напряжения для измерения малых токов. Однако переключение шунта порождает дополнительные проблемы программирования, поскольку должно выполняться синхронно с изменениями тока, потребляемого тестируемым устройством. Неожиданный большой скачок тока на шунте большого сопротивления вызовет значительный провал питающего напряжения и нарушит работу тестируемого устройства. Но даже если предположить, что нам удалось создать идеальный переключатель сопротивления шунта, в системе все равно будут возникать броски питающего напряжения, связанные с резким изменением сопротивления в цепи питания тестируемого устройства.

#### АЛЬТЕРНАТИВНОЕ РЕШЕНИЕ

Учитывая сложности проектирования и проверки токоизмерительных шунтов, следует отметить, что источники питания высокого класса, как правило, имеют встроенные измерительные функции. Семейство источников питания Agilent N7900A может измерять ток до 200 А с погрешностью менее 0,04%. Причем высокая точность измерения тока и напряжения является не просто абстрактной технической характеристикой. Эти источники тщательно тестируются и гарантируют соответствие техническим характеристикам в самых неблагоприятных условиях эксплуатации. Кроме того, источники питания N7900A используют тепловую модель для оценки температуры шунтирующего элемента в реальном времени и выполняют цифровую коррекцию температурной погрешности. Это повышает точность и значительно ускоряет измерения по сравнению с системами без компенсации. Кроме того, приборы семейства N7900A имеют



**Рис. 4. Источник питания с выносным датчиком**

второй внутренний диапазон малого тока, облегчающий измерение токов с широким динамическим диапазоном, позволяя обойтись без внешних шунтов и соответствующих цепей управления. Переключение диапазонов не вызывает отклонений выходного напряжения и происходит совершенно гладко с точки зрения измерений.

Достижение высокой точности измерений, выполняемых с помощью шунтов и цифровых мультиметров, связано с куда большими трудностями, чем можно предположить исходя из закона Ома. Многочисленные источники погрешностей снижают абсолютную точность значительно ниже теоретических возможностей мультиметра, а температурные зави-

симости отрицательно сказываются на воспроизводимости результатов. Для учета этих погрешностей и подтверждения результатов требуется много времени, сложное оборудование и богатый опыт. Применение встроенных измерительных функций лабораторного источника питания предоставляет более удобный доступ к результатам измерений, сокращает число необходимых приборов и дает уверенность в результатах за счет точно определенных показателей погрешности. ☑

*Tests such as device efficiency and battery drain analysis measure voltage and current to compute power and other electrical parameters. The accuracy of these tests is directly dependent on the accuracy of the constituent measurements, often targeting a total error of 0.1% or better. At a glance, current measurement might seem like a straightforward application of Ohms law, but measuring large or highly dynamic currents can be deceptively challenging due to range and accuracy limitations in real-world equipment.*

#### Динамические источники питания постоянного тока Agilent серии N7900A

Производительная система питания (APS) включает системные источники питания с выходной мощностью 1 кВт или 2 кВт, которые имеют лучшие в отрасли характеристики и инновационные функции, позволяющие решать самые сложные задачи тестирования. Динамические источники питания постоянного тока серии N7900 предназначены для использования в автоматизированных испытательных системах, в которых требуется быстродействующий динамический источник и высокая скорость измерений.

Каждый источник питания семейства APS может использоваться не только в качестве источника тока и напряжения, но и в качестве нагрузки, что идеально подходит для тестирования аккумуляторных батарей. При использовании совместно с блоком рассеивания мощности N7909A источник питания может работать в полном двухквadrантном режиме.

#### Ключевые возможности и технические характеристики

- Скорость тестирования в 100 раз выше, чем у обычных системных источников питания;
- Скорость обработки команд менее 2 мс;
- Скорость установления и сброса напряжения до 500 мкс;
- Возможность настройки скорости измерений для обеспечения оптимального сочетания быстродействия и точности;
- Возможность одновременного измерения параметров напряжения и тока с точностью, присущей цифровым мультиметрам;
- Измерение мощности, пиковой мощности, энергии в ватт-часах, емкости (запасаемой энергии) в ампер-часах;
- Возможность программирования положительных и отрицательных пределов тока, положительных и отрицательных значений выходного тока, а также автоматического нисходящего программирования;
- Полный двухквadrантный режим возможен при работе совместно с блоком рассеивания мощности N7909A, источник питания без данного блока обеспечивает режим работы с отрицательными значениями тока только в пределах 10% от номинального значения тока;
- Отслеживание событий с помощью регистратора «черного ящика» (требуется опция регистратора «черного ящика» N7908A);
- Отслеживание событий осуществляется в фоновом режиме при включении источника питания семейства APS;
- Регистрация измерительных данных, событий запуска, битов состояния и др.
- Создание испытательной системы с выходной мощностью до 10 кВт, благодаря возможности параллельного соединения источников питания семейства APS с обеспечением равного разделения тока между параллельными источниками питания;
- Гарантируется работа каждого параллельного источника питания в заданном режиме: постоянного напряжения (CV) или постоянного тока (CC).

Все источники питания серии Agilent N7900A оснащены встроенным интерфейсом LAN (соответствуют стандарту LXI), USB и GPIB, а также аналоговым интерфейсом.

