

# Резистивные методы измерения тока для точного контроля в электронных схемах

**Необходимость в измерении тока возникает практически в любой аппаратуре с функциями электронного управления или контроля ее работы. Совершенствование методов контроля приносит многочисленные преимущества, в том числе продление автономной работы карманных устройств, повышение КПД и снижение акустического шума оборудования, оснащенного электродвигателями, и более оперативное выявление неисправностей, повышающее уровень безопасности. Точность контроля зависит от точности выполняемых измерений, и точный контроль силы протекающего тока является одной из важнейших функций.**

**Эта статья знакомит читателя с токоизмерительными резисторами, их основными параметрами, методами измерения тока, а также преимуществами и недостатками трех типовых схем измерения тока на стороне источника.**

Даррен УЭНН (Darren WENN)

## Измерительные резисторы

Ток почти всегда измеряется косвенно — часто по падению напряжения ( $V = I \times R$ ) на резисторе, через который он протекает. Токоизмерительные резисторы недороги, могут обеспечивать высокую точность измерения в диапазоне от очень слабых до средних токов и пригодны для использования в цепях переменного и постоянного тока. Их недостаток — внесение дополнительного сопротивления в участок цепи, на котором производится измерение, что может вести к повышению выходного сопротивления источника и нежелательному эффекту нагрузки, а также вызывает рассеяние мощности на этом сопротивлении ( $P = I^2 \times R$ ). Поэтому токоизмерительные резисторы редко используются кроме как на слабых и средних токах.

Указанный недостаток можно свести к минимуму, используя низкоомные измерительные резисторы. Однако при этом падение напряжения на измерительном резисторе может стать сравнимым с входным напряжением смещения расположенной далее аналоговой цепи нормирования сигнала, что отрицательно скажется на точности измерения.

Если измеряемый ток содержит значимую высокочастотную составляющую, необходимо, чтобы измерительный резистор обладал малой собственной индуктивностью, иначе точность измерения снизится за счет реактивного напряжения на нем. К другим важным параметрам измерительного резистора относятся допуск на номинал, температурный коэффициент сопротивления (ТКС), термоЭДС, номинальный диапазон температур и номинальная мощность (последняя должна быть достаточно велика, чтобы резистор выдерживал кратковременные импульсы тока и переходные процессы).

термуЭДС, номинальный диапазон температур и номинальная мощность (последняя должна быть достаточно велика, чтобы резистор выдерживал кратковременные импульсы тока и переходные процессы).

## Измерение на стороне «земли» и источника

Есть два основных метода измерения тока — на стороне «земли» и на стороне источника. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки.

Как показано на рис. 1, при измерении на стороне «земли» резистор включается между нагрузкой и «землей». Обычно сигнал напряжения ( $V_{SEN} = I_{SEN} \times R_{SEN}$ ) на измери-

тельном резисторе настолько мал, что для получения измеримого выходного напряжения ( $V_{OUT}$ ) его приходится усиливать с помощью схем на операционных усилителях (например, неинвертирующего усилителя). Такую схему отличают низкое входное синфазное напряжение от «земли», простота и дешевизна, но при этом она подвержена помехам по «земляной» цепи, а потенциал «земли» с точки зрения нагрузки (пользовательской схемы) оказывается выше потенциала системной «земли», поскольку  $R_{SEN}$  добавляет нежелательное сопротивление в «земляную» цепь. К другим недостаткам относятся невозможность обнаружить протекание через нагрузку большого тока, вызванного случайным коротким замыканием (на истинную «землю»), а также необходимость в компонентах с низким  $V_{DD}$ .

В конфигурации с одним источником питания самым важным аспектом измерения тока на стороне «земли» является то, что диапазон синфазных входных напряжений ( $V_{CM}$ ) операционного усилителя должен включать потенциал «земли». Измерение на стороне «земли» следует применять в случаях, когда обнаружение короткого замыкания не требуется, а помехи по «земляной» цепи допустимы.

При измерении на стороне источника (рис. 2) измерительный резистор включается между источником питания и нагрузкой, что исключает помехи по «земляной» цепи, позволяет непосредственно соединить пользовательскую цепь с «землей» и делает воз-

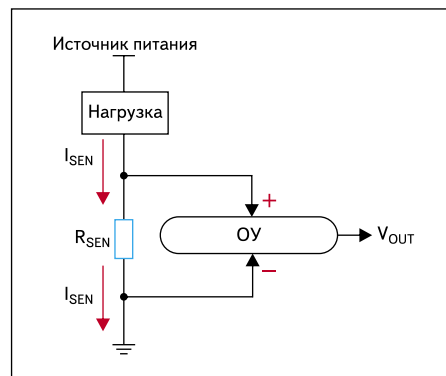


Рис. 1. Измерение тока на стороне «земли»

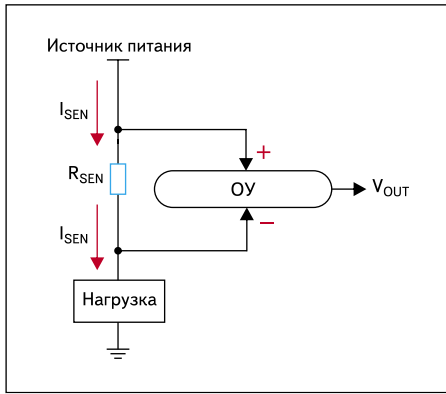


Рис. 2. Измерение тока на стороне источника

возможным обнаружение короткого замыкания. Однако измерительная схема должна выдерживать очень высокие динамически изменяющиеся синфазные входные напряжения, что усложняет конструкцию, повышает ее стоимость и вынуждает использовать компоненты с высоким  $V_{DD}$ .

В конфигурации с одним источником питания диапазон  $V_{CM}$  дифференциального усилителя должен быть достаточно широким, чтобы выдерживать высокие синфазные входные напряжения, и при этом дифференциальный усилитель должен подавлять динамически изменяющиеся синфазные входные напряжения.

### Реализация измерения на стороне источника

Измерение тока на стороне источника обычно применяется в схемах, где помехи по «земляной» цепи недопустимы и требуется обнаружение короткого замыкания — например, в схемах контроля электродвигателей и управления ими, схемах контроля и защиты от перегрузки по току, автомобильных системах безопасности и схемах контроля тока аккумуляторов.

На рис. 3 показана первая из схем измерения на стороне источника — это дифференциальный усилитель, состоящий из ОУ MCP6H01 и четырех внешних резисторов, который усиливает с коэффициентом  $R_2/R_1$  малое падение напряжения на измерительном резисторе, подавляя при этом синфазное входное напряжение.

Коэффициент подавления синфазного сигнала дифференциального усилителя ( $CMRR_{DIFF}$ ) определяется главным образом соотношением сопротивлений ( $R_1, R_2, R_1^*, R_2^*$ ), а не одноименным параметром операционного усилителя; применение резисторов с малыми допусками повысит стоимость схемы. При  $R_2/R_1 = 1$  и допуске резисторов 0,1% коэффициент подавления синфазного сигнала дифференциального усилителя  $CMRR_{DIFF}$  на постоянном токе для худшего случая будет равен 54 дБ, а если использовать резисторы с допуском 1%, он составит всего 34 дБ (подробные расчеты приведены в [1]).

Сопротивление  $R_{SEN}$  должно быть много меньше  $R_1$  и  $R_2$ , чтобы свести к минимуму эффекты резистивного нагружения. Входные сопротивления дифференциального усилителя с точки зрения  $V_1$  и  $V_2$  разбалансированы. Имейте в виду, что эффект резистивного нагружения и разбаланс входных сопротивлений ухудшит параметр  $CMRR_{DIFF}$ .

Опорное напряжение ( $V_{REF}$ ) позволяет сместить выходное напряжение усилителя выше относительно «земли». Напряжение  $V_{REF}$  должно вырабатываться источником с низким выходным сопротивлением, чтобы не снижать  $CMRR_{DIFF}$ .

Кроме того, как показано на рис. 3, входные напряжения ( $V_1, V_2$ ) могут быть представлены синфазным входным напряжением ( $V_{CM}$ ) и дифференциальным входным напряжением ( $V_{DM}$ ):

$$V_1 = V_2 = V_{CM} + V_{DM}/2$$

$$V_{OUT} = (V_1 - V_2) \times G + V_{REF} = V_{DM} \times G + V_{REF}$$

где  $G = R_2/R_1$ .

Чтобы выходное напряжение  $V_{OUT}$  не насыщало шины питания, его необходимо удерживать в допустимом диапазоне от  $V_{OL}$  до  $V_{OH}$ . Диапазон  $V_{CM}$  дифференциального усилителя расширен благодаря делителям на резисторах  $R_1, R_2, R_1^*$  и  $R_2^*$ . Если коротко, это налагает ограничения на номинальные значения  $V_{DM}$  и  $V_{CM}$  дифференциального усилителя (пример расчета — в [1]).

Итак, дифференциальные усилители характеризуются умеренным коэффициентом подавления синфазного сигнала, широким диапазоном синфазных входных напряжений, низким энергопотреблением, дешевизной и простотой, а к их недостаткам относятся эффекты резистивного нагружения, разбаланс входных сопротивлений и необходимость изменять номинал более чем одного резистора для корректировки коэффициента усиления.

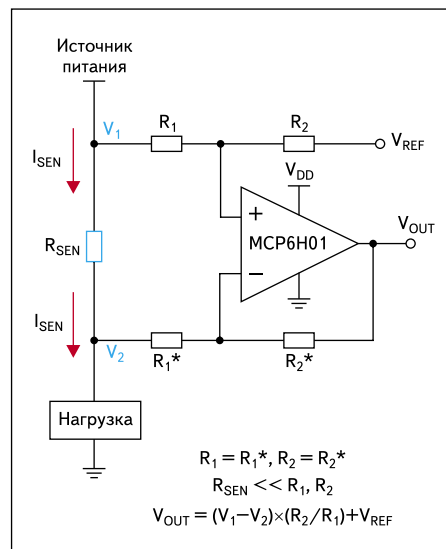


Рис. 3. Дифференциальный усилитель на одном ОУ

### Измерительный усилитель на трех ОУ

На рис. 4 показан измерительный усилитель на трех ОУ, который усиливает малые дифференциальные напряжения и подавляет высокие синфазные напряжения. Первый каскад представляет собой пару буферных усилителей с высоким входным сопротивлением ( $A_1, A_2$ ) и резисторов ( $R_F$  и  $R_G$ ), которые позволяют избежать проблем, связанных с резистивным нагружением входов и разбалансом входных сопротивлений. Вдобавок  $R_F$  и  $R_G$  повышают коэффициент усиления дифференциального напряжения входных буферных усилителей ( $G_{DM}$ ) до  $1 + 2R_F/R_G$ , сохраняя при этом коэффициент усиления синфазного напряжения ( $G_{CM}$ ) равным 1. Тем самым существенно повышается коэффициент подавления синфазного сигнала измерительного усилителя на трех ОУ ( $CMRR_{3INA}$ ), так как  $CMRR = 20 \log(G_{DM}/G_{CM})$ . Еще одно преимущество состоит в том, что суммарный коэффициент усиления измерительного усилителя можно варьировать, изменяя только  $R_G$ , а сопротивления  $R_1, R_1^*, R_2$  и  $R_2^*$  могут оставаться неизменными.

Второй каскад представляет собой дифференциальный усилитель ( $A_3$ ), усиливающий дифференциальное напряжение и подавляющий синфазное напряжение. На практике отношение  $R_2/R_1$  обычно устанавливается равным 1.  $CMRR_{3INA}$  определяется главным образом коэффициентом усиления дифференциального напряжения первого каскада и общей точностью согласования  $R_2/R_1$  и  $R_2^*/R_1^*$ . Допуски резисторов  $R_F$  и  $R_G$  не влияют на  $CMRR_{3INA}$ .

В случае использования измерительного усилителя на трех ОУ легко упустить из виду распространенную проблему — сужение диапазона синфазных входных напряжений ( $V_{CM}$ ). Как показано на рис. 4, входные напряжения ( $V_1, V_2$ ) могут быть представлены синфазным входным напряжением ( $V_{CM}$ ) и дифференциальным входным напряжением ( $V_{DM}$ ):

$$V_1 = V_2 = V_{CM} + V_{DM}/2$$

Усилители ( $A_1, A_2$ ) обеспечивают коэффициент усиления дифференциального напряжения ( $G_{DM}$ ), равный суммарному коэффициенту усиления ( $G$ ), и единичный коэффициент усиления синфазного сигнала ( $G_{CM}$ ).  $V_{OUT1}, V_{OUT2}$  и  $V_{OUT}$  должны оставаться в пределах допустимого диапазона выходных напряжений — от  $V_{OL}$  до  $V_{OH}$ . Конфигурация с измерительным усилителем на трех ОУ также налагает конкретные ограничения на  $V_{DM}$  и  $V_{CM}$ ; в частности, его диапазон  $V_{CM}$  значительно сузится при работе с высоким коэффициентом усиления.

Измерительный усилитель на трех ОУ характеризуется высоким коэффициентом подавления синфазного сигнала ( $CMRR_{3INA}$ ),

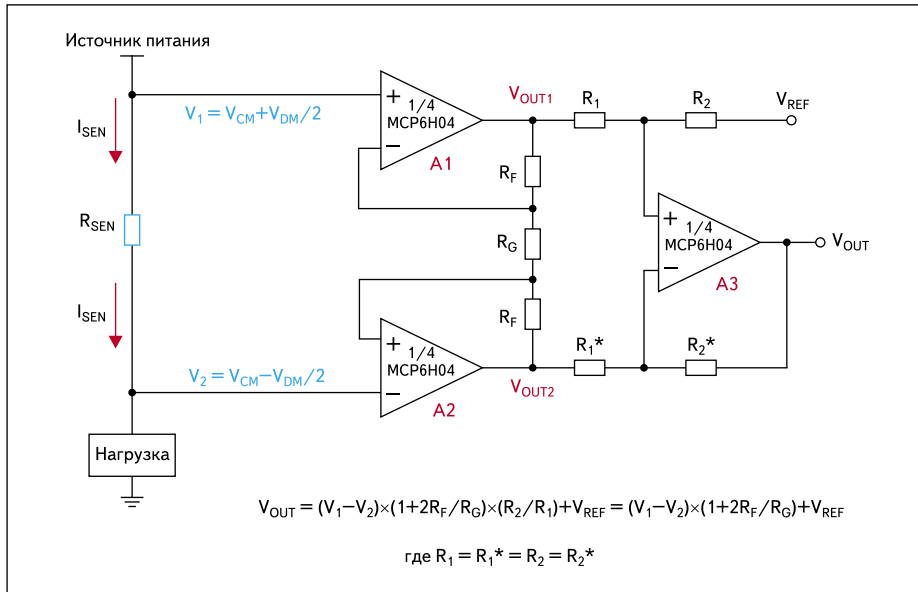


Рис. 4. Измерительный усилитель на трех ОУ

отсутствием эффектов резистивного нагружения, сбалансированными входными сопротивлениями и возможностью варьировать суммарный коэффициент усиления, изменяя номинал всего лишь одного резистора. При этом диапазон  $V_{CM}$ , наоборот, сужается, а большее число операционных усилителей повышает энергопотребление и стоимость.

### Измерительный усилитель на двух ОУ

Измерительный усилитель на двух ОУ, изображенный на рис. 5, отличается от измерительного усилителя на трех ОУ меньшей стоимостью и более низким энергопотреблением. Его входные сопротивления также весьма высоки, что позволяет избежать проблем, связанных с эффектами резистивного нагружения и разбалансом входных сопротивлений. Коэффициент подавления синфазного сигнала этого усилителя ( $CMRR_{2INA}$ ) определяется главным образом суммарным коэффициентом усиления и общей точностью согласования  $R_2/R_1$  и  $R_2^*/R_1^*$ .

Как показано на рис. 5, входные напряжения ( $V_1$ ,  $V_2$ ) могут быть представлены синфазным входным напряжением ( $V_{CM}$ ) и дифференциальным входным напряжением ( $V_{DM}$ ):

$$V_1 = V_{CM} - V_{DM}/2$$

и

$$V_2 = V_{CM} + V_{DM}/2.$$

Опять-таки,  $V_{OUT}$  и  $V_{OUT1}$  должны оставаться в пределах допустимого диапазона выходных напряжений от  $V_{OL}$  до  $V_{OH}$  и эта конфигурация также налагает ограничения на значения  $V_{DM}$  и  $V_{CM}$ .

В отличие от измерительного усилителя на трех ОУ, диапазон  $V_{CM}$  усилителя

на двух ОУ значительно сузится при работе с низким коэффициентом усиления. Более того, асимметрия схемы на пути прохожде-

ния синфазного сигнала вызовет задержку по фазе между  $V_{OUT1}$  и  $V_1$ , ухудшив коэффициент подавления синфазного сигнала на переменном токе. На рис. 5 видно, что входной сигнал  $V_1$  должен пройти через усилитель  $A_1$ , прежде чем он будет вычтен из  $V_2$  усилителем  $A_2$ . Таким образом, напряжение  $V_{OUT1}$  слегка задерживается и сдвигается по фазе относительно  $V_2$ . Это существенное ограничение.

На рис. 6 показано, что, включив резистор  $R_G$  между двумя инвертирующими входами, можно легко задавать суммарный коэффициент усиления измерительного усилителя на двух ОУ, изменяя только  $R_G$ . Отношение  $R_2/R_1$  обычно следует выбирать так, чтобы обеспечить требуемое минимальное усиление. Еще одно преимущество дополнительного резистора  $R_G$  заключается в том, что в этом случае можно избежать использования больших номиналов  $R_2$  и  $R_2^*$  в конфигурациях с очень высоким коэффициентом усиления. Как и для других конфигураций, подробные расчеты с результирующими требованиями к  $V_{DM}$  и  $V_{CM}$  для измерительного усилителя на двух ОУ с дополнительным резистором  $R_G$  приведены в [1].

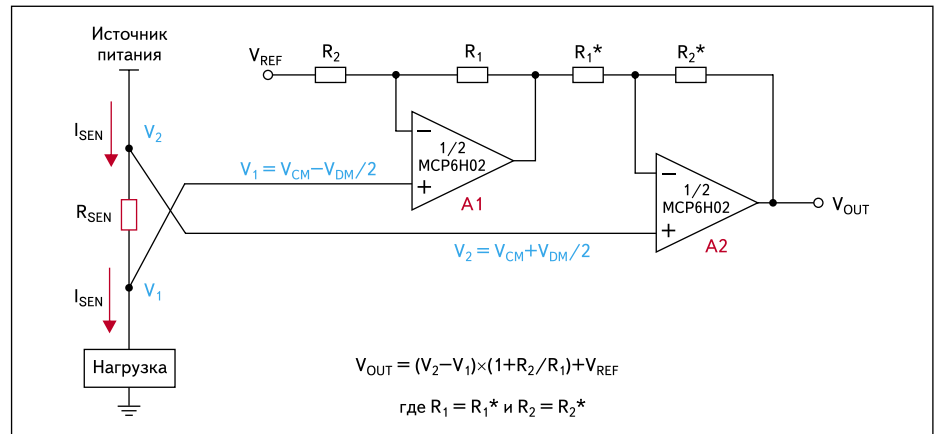
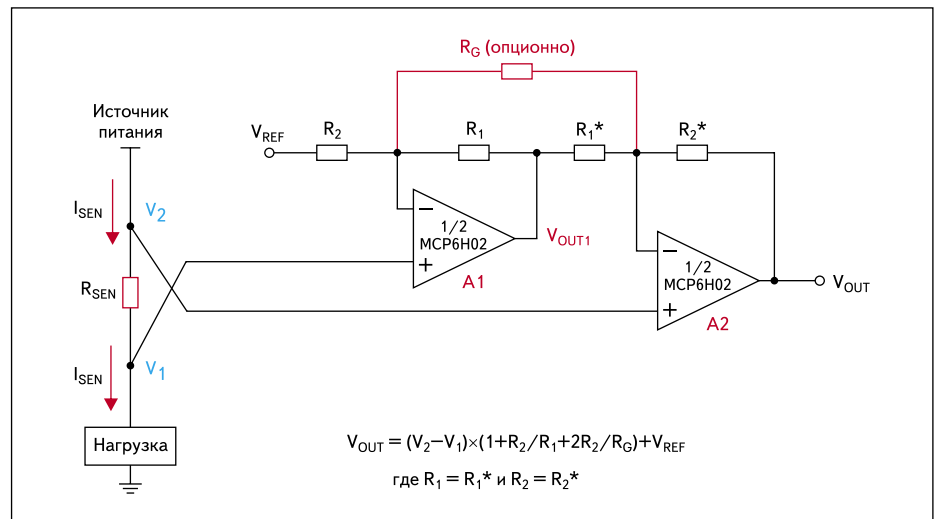


Рис. 5. Измерительный усилитель на двух ОУ

Рис. 6. Измерительный усилитель на двух ОУ с дополнительным резистором  $R_G$

Этот окончательный вариант схемы характеризуется высоким коэффициентом подавления синфазного сигнала на постоянном токе ( $CMRR_{2INA}$ ), отсутствием эффекта резистивного нагружения, сбалансированными входными сопротивлениями, а также пониженными стоимостью и энергопотреблением по сравнению с измерительным усилителем на трех ОУ. Его недостатками являются более узкий диапазон  $V_{CM}$ , низкий коэффициент подавления синфазного сигнала ( $CMRR_{2INA}$ ) на переменном токе, обусловленный асимметрией цепи, и невозможность работы при единичном усилении. ■

### Литература

1. Zhen Yang. Current Sensing Circuit Concepts and Fundamentals. Microchip Application Note AN1332 — <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01332A.pdf>
2. Smither M. A., Pugh D. R., Woolard L. M. C.M.R.R. Analysis of the 3-Op-Amp Instrumentation Amplifier // Electronics Letters. 2 Feb. 1989.
3. Sedra A. S., Smith, K. C. Microelectronic Circuits. 4<sup>th</sup> Edition. Oxford University Press, 1998.