

Микросхема для весов и контроля температуры

Человечество столкнулось с задачей определения веса еще на ранних стадиях своего развития, и с той поры вплоть до наших дней эта проблема остается для него актуальной. Она все еще не снята с повестки дня вовсе не потому, что не имеет решения — определять вес того или иного объекта, выражая его через некие общепринятые эталоны, человек умеет давно, — она актуальна прежде всего потому, что хочется знать вес с наибольшей возможной точностью и получать результат взвешивания в минимально короткое время. При этом важно решить проблему с наименьшими затратами сил и средств, требующихся для достижения результата, и представить его в форме наиболее удобной для восприятия и дальнейшей обработки. С этой целью были созданы самые разнообразные виды весов, позволяющие взвешивать массы в диапазонах от нескольких миллиграммов до нескольких десятков и даже сотен тонн, взвешивающие с различной скоростью и точностью, в покое или при непрерывном перемещении груза по транспортеру.

Леонид Вихарев

vleo@atel.ru

Все это разнообразие устройств и приемов взвешивания, всю широкую номенклатуру этих приборов можно разделить на несколько групп, исходя из устройства и принципа работы весов. Сегодня наиболее широко применяются весы трех основных видов: механические, электромеханические и электронные. Из них нас интересует только последний вид устройств.

Принцип действия электронных весов сводится к измерению силы веса, воздействующей на первичный датчик, посредством преобразования возникающих изменений, например деформации, в пропорциональный выходной электрический сигнал. Первичные датчики, применяющиеся сегодня в весовой технике, можно разделить по следующим типам:

- **Виброчастотный** (струнный). Его действие основано на изменении частоты колебаний натянутой металлической струны в зависимости от величины силы, приложенной к датчику. При хорошо отлаженном производстве виб्रोчастотные датчики оказываются весьма недорогими и, как следствие, оборудованные ими весы также дешевы. Однако нестабильность таких датчиков, повышенные требования к условиям работы, а также сравнительно низкая точность привели к тому, что данный тип датчиков применяется в весовом оборудовании редко.

ссят от колебаний температуры и питающих напряжений, то некоторые производители весов планируют начать серийный выпуск «интеллектуальных» датчиков. Предполагается соединить их с микропроцессором, который отслеживал бы отклонения и вводил корректирующие поправки в результат взвешивания.

- **Тензометрический**. В переводе с латинского «тензо» — деформация. Действие такого датчика основано на преобразовании деформации упругих элементов в изменение электрического сопротивления. В качестве упругого элемента выступают металлические изделия специальной конструкции. Преобразователем же служит высокочувствительная спираль из специального сплава, например, константана, которая особым способом приклеивается к упругому элементу на участке, где деформация наиболее явно выражена. Такая конструкция, по статистике, оказалась самой надежной. Тензометрическими датчиками оснащены весы большинства российских и зарубежных производителей весов.

Итак, тензодатчики — самые надежные и точные устройства для преобразования силы тяжести в электрические сигналы. По этой причине весы на базе таких датчиков — самые распространенные в мире.

До сих пор измерительные приборы на базе тензорезисторов требовали применения высококачественных аналоговых усилителей, очень точных термостабильных резисторов и конденсаторов, хороших источников опорного напряжения и многозарядных аналогово-цифровых преобразователей (АЦП). Этот традиционный подход наиболее понятен и отработан, но он имеет серьезные недостатки. Главными из них являются проблемы, связанные с усилением очень слабого изменения сигнала тензодатчика и преобразование его к цифровому виду.

Определим деформацию упругого элемента, воспринимающего силу тяжести взвешиваемого объекта как относительное изменение длины тензодатчика:

$$E_{\max} = \Delta L/L$$

Полномасштабное изменение длины тензодатчика ΔL_{\max} типично находится в диапазоне 500–1000 μ (то есть приблизительно 0,05–0,1% к исходному размеру). Конструкция тензодатчика позволяет сконцентрировать деформацию к особой точке, где сопротивление, сделанные специальным образом, подклеены к мосту. При наличии деформации сопротивление тензодатчика изменяется. Отношение изменения сопротивления к изменению длины называется К-коэффициентом:

$$K = (\Delta R/R)/(\Delta L/L)$$

Для тензодатчиков на основе металлической фольги К приблизительно равен 2. Типичный импеданс мостовых сопротивлений — 350–1000 Ом. Обычно величина изменения сопротивления тензорезистора при данных параметрах датчика составляет

$$\Delta R = R \times E_{\max} \times K = 1 \text{ Ом}$$

Из-за крайне малого возбуждения тензодатчика приблизительно 9–10 бит разрешения преобразователя теряется. Для того чтобы погрешность результата не превышала, скажем, 0,5 мОм, что равно 1 для диапазона в 2000 делений (2^{11} бит), необходимое начальное разрешение преобразователя должно быть 21 бит.

Желание получить высокую результирующую точность заставляет применять АЦП на 24 разряда, например AD7730 фирмы Analog Devices. Но работать с сигналами в диапазоне нескольких десятков нановольт крайне трудно: на результат накладываются всевозможные посторонние электромагнитные излучения, колебания температуры, микровибрации датчиков, нелинейность шкалы тензорезисторов и помехи, возникающие на плате

в моменты переключения окружающей логики. (А логические схемы обязательно присутствуют и, как на грех, всегда оказываются где-нибудь рядом, как ни пытайся отодвинуть их подальше и развязать по питанию.) В таких условиях трудно добиться высокой точности преобразования. Ведутся мучительные поиски оптимальной разводки печатной платы. Прилагаются героические усилия по подавлению наводок и помех на шинах питания и «земле». Но, к сожалению, получить вожделенные 24 разряда никак не удастся. Немногим счастливицам удалось добиться хотя бы 20-разрядной точности преобразования. Конечно, на практике такая точность не нужна. Очень хорошими считаются весы, имеющие шкалу в 3–4 тысячи эффективных делений (2^{12}). Некоторые особо точные устройства имеют шкалу на 6–8 тысяч делений (2^{13}). Такая точность редко получается напрямую. Достигнуть такого разрешения можно путем обработки первичных данных, усреднения их, отбрасывания явно ошибочных показаний.

Трудно и очень дорого достаются весы с высокой точностью взвешивания.

Если же отойти от традиционной методики и перенести эту задачу в область временных измерений, то, оказывается, можно свести всю эту сложную и дорогую электронику к единственному чипу TDC. (TDC — время-цифровой преобразователь. Необходимую информацию по новейшим разработкам TDC, их устройству и принципу работы можно найти в одном из предыдущих выпусков «КиТ» [1].) Как оказалось, выполнить высокоточные преобразования во временной области значительно легче, чем классические преобразования с помощью АЦП. Эта методика позволяет работать в широком диапазоне колебаний температуры и напряжения питания и дает возможность сократить стоимость конструкции по сравнению с традиционными решениями.

Кратко суть дела заключается в следующем: определяется не соотношение номиналов резисторов в традиционной мостовой схеме, а время заряда и разряда конденсатора через резисторы в плечах моста. Цифровой импульс

известной длительности поступает на тензорезистор мостовой схемы, а RC-цепочка, образованная с помощью этого резистора влияющая на импульс, меняя его ширину. Таким образом, при неизменном номинале конденсатора полная информация об изменении номинала резистора кодируется в ширине цифрового импульса, которая с очень высокой точностью и линейностью измеряется при помощи TDC.

Читатель, вероятно, знает, что подобный подход применяется в широко распространенных электронных тестерах при измерении номиналов конденсаторов. Только здесь зависимость прямо противоположная — номинал резистора известен и неизменен, а вот номинал конденсатора предстоит определить. Достигается это путем измерения времени заряда и разряда исследуемого конденсатора. Идея понятная, не новая, но в приложении к задачам взвешивания применена впервые и реализована в виде специализированной высокоточной микросхемы PS-01.

Микросхема PS-01

Микросхема предназначена для работы:

- в тензометрических системах и системах контроля температуры;
- в преобразователях давления, силы натяжения, сжатия и в весах;
- в качестве программируемого усилителя-преобразователя в мостовых схемах.

Схема, приведенная на рис. 1, показывает пример применения микросхемы PS-01 в весовых устройствах. Общеизвестная мостовая схема здесь слегка изменена:

- в точках замера моста имеются дополнительные конденсаторы (5–50 нФ);
- питание выполнено отдельным проводником для каждого плеча моста.

Электронный блок на PS-01 не требует полного моста для выполнения полноценных измерений, так как ему вполне достаточно двух сопротивлений (тензодатчиков) одного плеча моста. Нет никакой необходимости в отдельном питании элементов моста, поскольку оно обеспечивается PS-01. Это устройство являет-

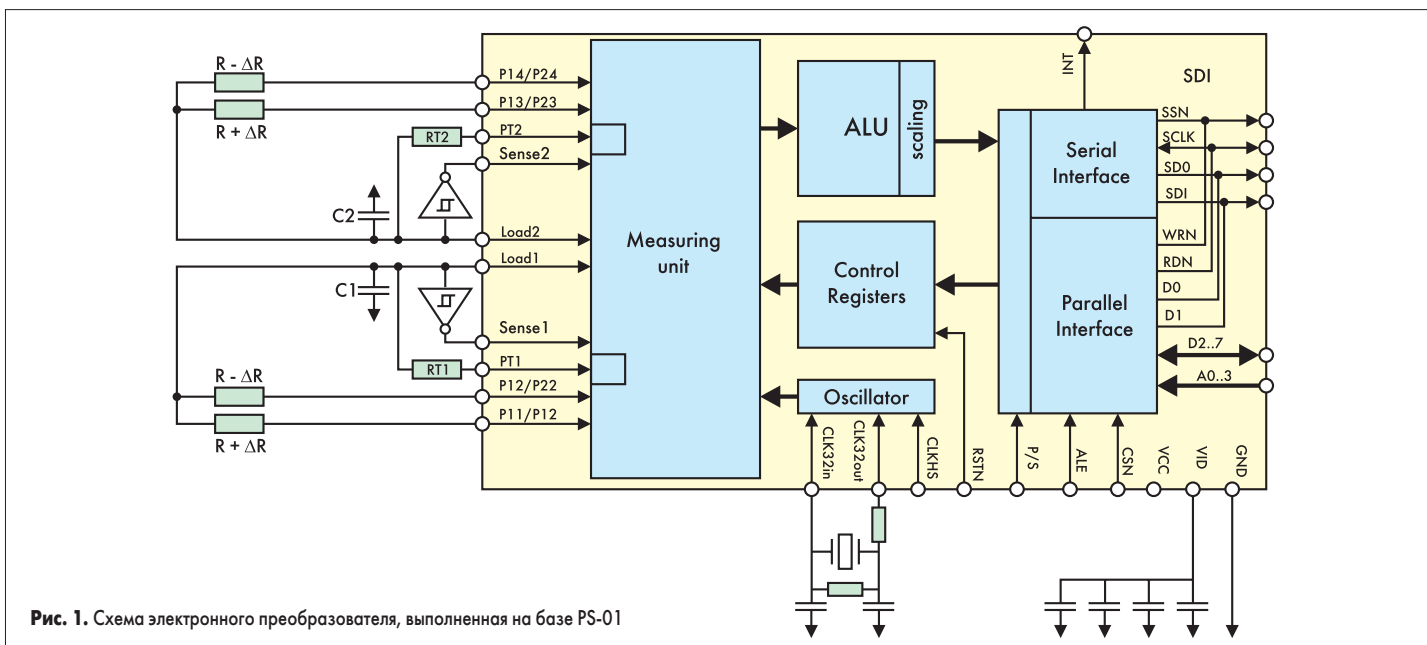


Рис. 1. Схема электронного преобразователя, выполненная на базе PS-01

ся полностью цифровой схемой без какой-либо аналоговой части внутри. Специальная схема драйвера вместе с последующей мощной цифровой обработкой компенсирует влияние температуры и колебаний напряжения питания на входах. Схема, приведенная на рис. 1, является практически полной принципиальной схемой преобразователя. Резисторы RT1 и RT2 являются дополнительными, необязательными, и предназначены для выполнения параллельных температурных измерений.

Классические проекты основаны на измерении дифференциального выходного напряжения моста. Микросхема PS-01 непосредственно измеряет относительное изменение сопротивления.

$$\text{Результат} = P = \Delta R/R$$

PS-01 внутренне конвертирует результат в измерение деформации и представляет данные в следующем формате:

$$\text{Data} = 1/M \times P \times 10^6$$

где M — нормирующий коэффициент, множитель, позволяющий получать данные в нужном для пользователя формате (килограммы, граммы, тонны или какие-либо другие единицы).

Элементы полумоста или полного моста в действительности могут иметь неодинаковые резисторы. Фактически может существовать такое различие в номиналах, которое превышает отклонение, вызванное деформацией тензодатчика. PS-01 может обнаруживать эту разницу и вычитать ее из результатов преобразования. Для выполнения такого действия необходимо только записать соответствующую информацию в один из регистров управления.

Требуемая точность системы и желаемая дискретность отсчета

Преобразование, выполняемое PS-01, основано на измерении времени, которое является следствием относительного изменения сопротивления $\Delta R/R$ в датчике деформации. Типичная точность единичного измерения времени составляет 17,6 бит. Вообще разрешение (точность) PS-01 программируется установкой усредняющего коэффициента. Среднее квадратичное отклонение результата улучшается приблизительно с коэффициентом $AVRate$, где $AVRate$ — это 12-разрядное число (оно никогда не равно 0), которое устанавливается программно во внутренних регистрах PS-01.

$$\text{Разрешение} = \Delta R_{\text{min}}/R = 17,6 \text{ бит} + \log_2 \sqrt{AVRate}$$

Изменяя коэффициент усреднения, пользователь может выбирать нужное разрешение в интервале между высокоточным измерением (~24 бит, 3,6 Гц) и высокоскоростным, но менее точным (17,6 бит, 25 кГц). Данные таблиц 1 и 2 устанавливают связь между коэффициентом усреднения, точностью и скоростью проведения измерений. На рис. 2 эти зависимости отражены графически.

Таблица 1. Деформация: максимальное разрешение

AVRate	Разрешение TDC	Разрешение при использовании датчиков с $K=2$ и 500μ	Разрешение при использовании датчиков с $K=2$ и 1000μ	
	Эффектив. бит	Эффектив. бит	%	Эффектив. бит
1	17,67	8	0,4	9
80	20,87	11	0,048	12
250	21,87	12	0,023	13
1000	22,82	13	0,012	14
4095	23,94	14	0,006	15

Таблица 2. Разрешение TDC

Усредняющий коэффициент	Максим. темп измерения, кГц	Эффективных бит	Шум, $\mu\text{В}/5 \text{ В}$
1	25000	17,79	14702
5	5000	18,96	35431
20	1250	19,96	0,98
40	625	20,46	0,70
80	312,5	20,96	0,49
250	100	21,78	0,28
400	62,5	37977	0,22
1000	25	22,78	0,14
2000	37753	23,28	0,10
4000	45809	23,78	0,07
10 000*	37743	24,44	0,04
25 000*	1	37919	0,03
48 000*	0,52	25,57	0,02

* — с внешним усреднением

Максимальный темп измерения определяется выбранной комбинацией RC, то есть соотношением сопротивления тензорезистора и номинала конденсатора. Для высокоточных измерений рекомендуется выбирать $\tau_{RC} = 5...7$ мкс. Для скоростных измерений τ_{RC} может быть меньше и находиться в диапазоне 4...5 мкс. Однако эта величина не может быть меньше, чем 2 мкс из-за внутренних временных ограничений.

Измерения выполняются с помощью TDC, сердцем которого является 20-разрядный высокоскоростной счетчик, дополненный интерполятором на линиях задержки. Нормальным разрешением является точность, равная единице младшего разряда TDC. Она приблизительно равна 28 пс, но при помощи специальных встроенных средств эта точность может быть удвоена. Типичной погрешностью для прибора является отклонение, равное 0,9 величины младшего разряда TDC. С помощью

процедуры усреднения эта величина может быть уменьшена.

Пример: Если $AVRate = 1$, то разрешение TDC примерно равно 17,6 бит, а темп измерения — 25 кГц. Возьмем тензодатчик с деформацией 1000μ и $K = 2$. Это как раз соответствует разрешению 9 бит (эффективных) при максимальной деформации.

1. Если требуется разрешение 12 бит (разрешение должно быть улучшено еще на 3 бита, в 8 раз). Усреднение должно быть $AVRate = 8^2 = 64$. Максимальный темп измерения будет $25 \text{ кГц}/64 = 390 \text{ Гц}$.
2. Если требуется разрешение 15 бит (разрешение должно быть улучшено на 6 бит, то есть в 64 раза). Усреднение должно быть $AVRate = 64^2 = 4096$.

Скорость измерения будет составлять $25 \text{ кГц}/4096 = 6,1 \text{ Гц}$.

Способы проведения измерений

Возможно несколько способов проведения измерений с помощью микросхемы PS-01: Измерения с полумостом (H-Mode, см. рис. 3).

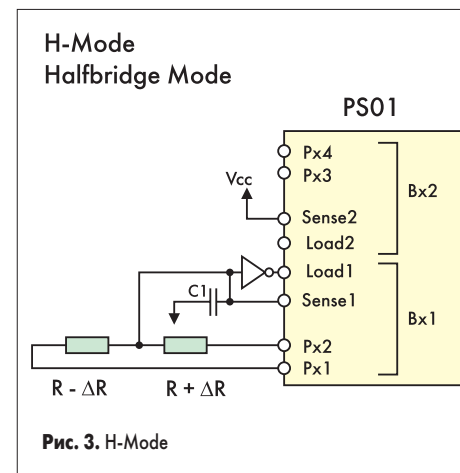


Рис. 3. H-Mode

В этом режиме измеряется сопротивление только двух резистивных датчиков. Поскольку имеются входы для подключения 2 плеч (полумостов), то пользователь должен сам программным путем выбрать нужные. Возможными вариациями здесь могут быть:

- Режим малого потребления или высокоскоростной режим измерения.
- Режим нормальной или высокой точности.

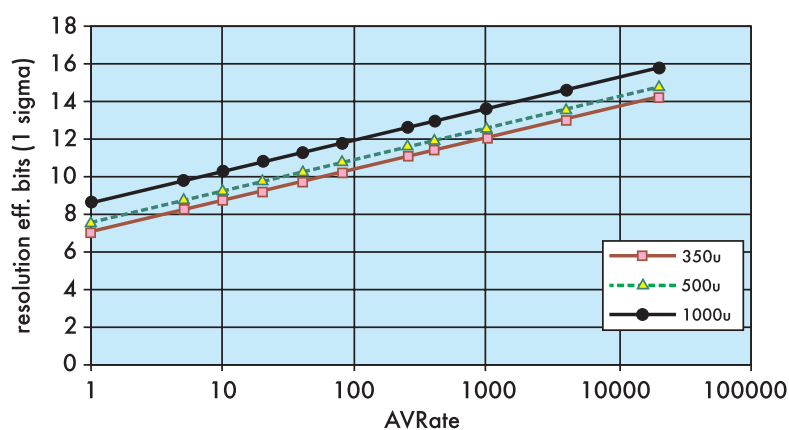


Рис. 2. Зависимость разрешения от коэффициента усреднения

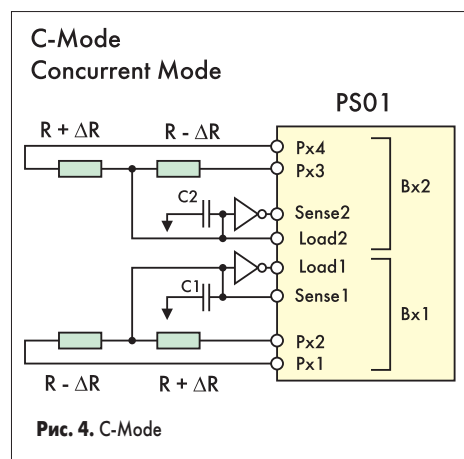


Рис. 4. C-Mode

Способ измерения в конкурирующем режиме для полного моста (C-Mode, см. рис. 4).

При этом способе проведения измерений обслуживаются оба плеча в полном мосте. Темп измерения возрастает приблизительно вдвое по сравнению с другими способами. Этот режим предназначен для проведения высокоскоростных измерений. Здесь возможен вариант измерений с нормальной или высокой точностью. Существуют ограничения — только высокоскоростной режим.

Попеременный способ измерений с двумя отдельными входами (полный мост) (A-Mode, см. рис. 5).

При этом способе производятся измерения попеременно на каждом плече моста. Таким образом можно получить необходимые результаты даже в случае повреждения одного из датчиков. Способ рекомендуется для особо ответственных измерений при малой потребляемой мощности. Возможные комбинации:

- Низкое потребление или высокая скорость измерений.
- Нормальная или высокая точность.

Кроме перечисленных способов выполнения измерений пользователь может выбирать между двумя частотными режимами:

- Режим низкого потребления (малой потребляемой мощности), 32 кГц.
- Высокоскоростной режим.

При работе в первом из них к входам микросхемы подключается внешний кварцевый резонатор на 32 кГц. Этот способ характерен очень маленькой потребляемой мощностью при низких скоростях выполнения измерений.

Работа во втором скоростном режиме происходит при тактировании схемы внешним вы-

сокочастотным сигналом, который поступает на встроенный предделитель. Допускается работа на частотах внешнего генератора вплоть до 80 МГц. При этом внутренняя частота будет находиться в диапазоне 30 кГц...10 МГц для первого частотного диапазона и 2,5...10 МГц для второго диапазона. Необходимо отметить, что низкие скорости работы предпочтительнее, поскольку для них характерны наименьшие погрешности измерений.

Температурные измерения

Специфической особенностью микросхемы PS-01 является возможность прямого измерения отношения любого из резисторов к величине эталонного сопротивления. Каждое плечо измерительного моста имеет собственный вход для измерения меняющихся номиналов сопротивлений. Так как металлические тензорезисторы, как правило, обладают очень хорошей термостабильностью, они могут выступать в роли эталонных сопротивлений. Термозависимый резистор может подключаться к сенсорному входу. Контролируя колебания сопротивления в плече измерительного моста, можно выполнять измерения температуры. Пьезорезистивные

датчики довольно сильно зависимы от колебаний температуры, поэтому они могут быть использованы как температурные сенсоры. В такой системе нет необходимости настаивать на том, чтобы температурный коэффициент тензорезистора и К-фактор тензодатчика имели идентичные и противоположные значения. Достаточно просто знать их корреляции, чтобы программно корректировать результаты.

Управление

Микросхема PS-01 имеет 8-разрядный стандартный микроконтроллерный параллельный и последовательный SPI-интерфейс. Управление процессами передачи в параллельном режиме производится при помощи сигналов WRN, RDN, CSN, ALE 8-разрядной шины данных и 4-разрядной адресной шины. При работе через последовательный интерфейс используются следующие сигналы: SSN — Slave Select, SCLK — SPI clock, SDI — Data in, SDO — Data out.

Управление PS-01 и считывание результатов производится путем обращения к регистрам. К ним относятся:

- 13 8-разрядных установочных регистров;
- 1 8-разрядный управляющий;
- 2 8-разрядных регистра результата;
- 2 8-разрядных регистра температуры;
- 1 16-разрядный статусный регистр;
- по 2 24-разрядных и 16-разрядных регистра TDC.

Уникальная полностью цифровая микросхема PS-01, предназначенная для работы с тензодатчиками, температурными датчиками и датчиками силы, давления, натяжения и т. п. устройствами, дает возможность получить высокие точностные характеристики без лишних хлопот. Очень низкое токопотребление, высокая стабильность результатов и гибкость в работе — качества, позволяющие создавать приборы, не уступающие лучшим мировым аналогам.

Полную информацию по микросхеме PS-01 можно получить по адресу www.atel.ru.

Литература

1. Вихарев Л. Микросхемы для прецизионного измерения времени // Компоненты и технологии. 2003. № 1.

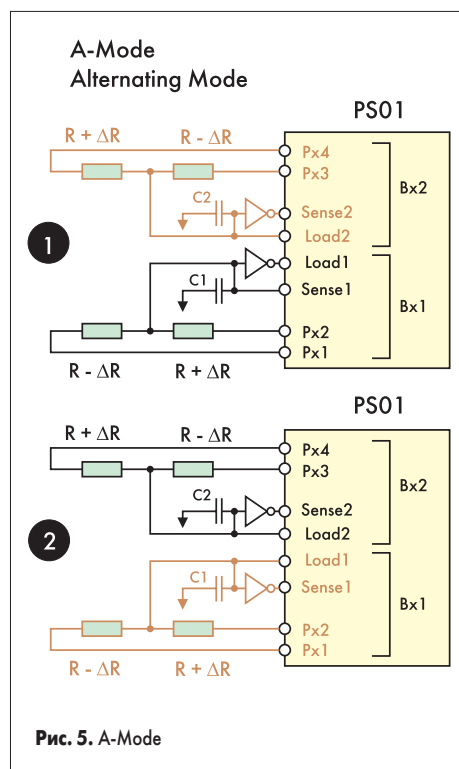


Рис. 5. A-Mode