

Мостовые схемы как основа измерительных модулей Dataforth

Андрей Краснов

В статье рассматриваются базовые схемы и принципы измерительных мостов, а также влияние различных характеристик на выходные сигналы. Их применение на базе устройств формирования и нормализации сигнала компании Dataforth.

Сэмюэл Хантер Кристи (1784–1865) родился в Лондоне в семье Джеймса Кристи, основателя аукционов изобразительного искусства Christie's Fine Art Auctioneers. Сэмюэл изучал математику в Тринити-колледже и после его окончания почти 50 лет преподавал в Королевской военной академии. Кристи внёс большой вклад в развитие учений о магнетизме, например, в изучение зависимости магнитных сил от температуры и воздействия солнечных лучей на земной магнетизм. В 1833 году он опубликовал статью о магнитоэлектрической проводимости различных металлов, показав, как проводимость провода изменяется обратно пропорционально длине и прямо пропорционально квадрату диаметра провода. К сожалению, работы Кристи стали известны лишь после публикаций Уитстона. Хотя Чарльз Уитстон (английский физик и изобретатель) и признал ценность работ Кристи; он был первым, кто широко использовал схему, носящую его имя, и разработал для неё множество важных приложений. По сей день (162 года спустя) мост Уитстона остаётся наиболее чувствительным и точным методом измерения значений сопротивления. Сэмюэл Кристи так и не получил признания за свою схему с мостом. Представьте себе, какой доход принесла бы сегодня оригинальная схема, изобретённая Кристи, при гонораре всего в пять центов за каждую использованную мостовую схему.

Как уже было сказано выше, мостовые схемы используются уже более 150 лет. На сегодняшний день мост по-прежнему

является наиболее экономичной схемой для точного измерения различных видов электрических величин, в том числе и сопротивления. Первоначальная топология мостовой схемы претерпела множество модификаций и применялась в таких приложениях, как измерение переменного тока, автоматическая балансировка, в различных генераторах и усилителях. Возможно, наиболее известным применением схемы Сэмюэля Хантера Кристи является мостовое включение тензорезисторов для измерения типа деформации в механических узлах и строительных конструкциях. Как один из мировых лидеров в области разработки и производства модулей согласования и нормализации сигналов, компания Dataforth с успехом использует мостовые схемы в своих разработках. А технические специалисты компании поделились основными принципами работы, но больше внимания уделили тонкостям возбуждения мостовой схемы и связанным с ней характеристикам.

Базовые мостовые схемы

В приведённых ниже примерах основное внимание уделяется топологиям мостовой схемы, показанной на рис. 1, с одним резистивным переменным элементом. Исследуются выходные характеристики, в том числе влияние сопротивления цепи на мостовое возбуждение как по напряжению, так и по току, а также линейность моста. Погрешностями из-за сопротивлений плохо выполненных контактов и коррозии из-за контакта разнородных металлов пренебрегают. Более того, сопротивле-

нием выходной линии также пренебрегают, поскольку стандартной практикой является измерение выходного напряжения моста устройствами с высоким импедансом (обычно > 1 МОм).

Аналитические исследования в этом документе сосредоточены на мостовом сопротивлении, что означает, что все резисторы моста имеют сопротивление «R», когда они не подвергаются воздействию переменных процесса возбуждения. На рис. 1 показан датчик поля R-омного мостового типа со всеми мостовыми резисторами (R_1, R_2, R_3, R_x), расположенными в точке измерения поля; однако, поскольку резистор R_x является резистивным сенсорным элементом моста, его сопротивление изменяется в зависимости от параметров контролируемого процесса, таких как температура, расход, давление, уровень, влажность, деформация и т.д. Во всех топологиях резистивного моста R_1, R_2, R_3 равны R , а $R_x = (R + \Delta R)$, где ΔR – функция переменных процесса.

Примеры

В дальнейшем будут рассмотрены топологии двух категорий резистивного моста. Резистивные мосты, относящиеся к категории 1, определяются как топология, в которой все резисторы расположены на объекте, а один или несколько элементов подвергаются воздействию переменной процесса. Мосты категории 2 определяются как имеющие один или несколько резистивных сенсорных элементов моста, расположенных на объекте и подверженных воздействию переменных процесса, и остальных рези-

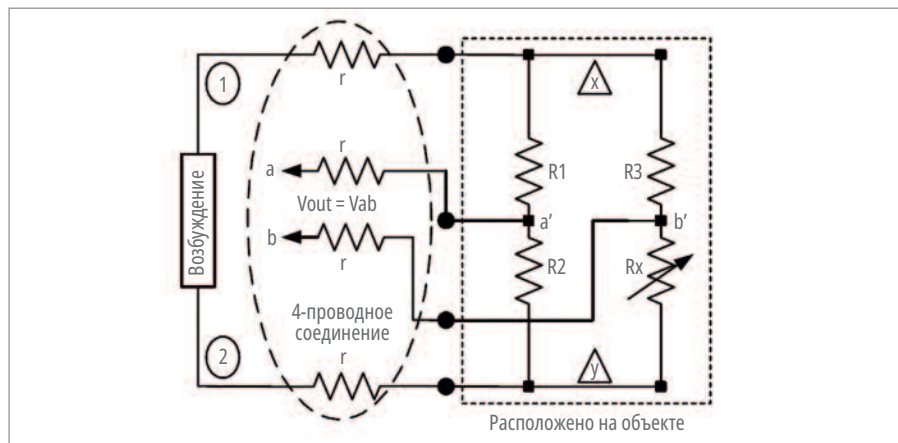


Рис. 1. Базовая мостовая схема с переменным резистивным элементом R_x

сторов, расположенных в точке электрического возбуждения. Мосты с одним или двумя элементами переменной процесса часто называют четверть- и полумостами соответственно.

Мост категории 1 с возбуждением по напряжению

Этот пример иллюстрируется рис. 1, где источником возбуждения является напряжение V_{12} . Фактическое напряжение возбуждения моста V_{xy} непостоянно из-за падения напряжения на сопротивлении цепи возбуждения. Выходное напряжение моста $V_{out} = (V_a - V_b) = V_{ab}$. Если V_{ab} всегда измеряется с помощью вольтметра с высоким импедансом (обычно > 1 МОм), то сопротивлением измерительной линии можно пренебречь, и $V_{ab} = V_{a'b'}$.

В качестве примера влияния сопротивлений измерительных линий предположим сопротивление линии 10 Ом, вольтметр с входным сопротивлением 1 МОм и мост 120 Ом. Ошибка, вносимая вольтметром на клеммы $a'-b'$, составляет приблизительно 0,99988, тогда как на клеммы $a-b$ она составляет приблизительно 0,99987, или разница составляет $-0,001\%$.

$$V_{ab} = V_{12} \times \left[\frac{R_2}{R_2 + R_1} - \frac{R_x}{R_x + R_3} \right] = \frac{((R_2 \times R_3) - (R_1 \times R_x))}{(R_1 + R_2) \times (R_3 + R_x)} \quad (1)$$

Уравнение 1 иллюстрирует выходное напряжение $V_{out} = V_{ab}$ на рис. 1 без учёта всех сопротивлений цепи.

Уравнение 1 является классическим уравнением баланса моста, определяющим набор номиналов резисторов, уравновешивающих мост, в результате чего выходное напряжение моста равно нулю, $V_{ab} = 0$. Это условие возникает, когда $R_1 \times R_x = R_2 \times R_3$. Также стоит отме-

тить, что классическое условие баланса моста действует независимо от сопротивления цепи и значения напряжения возбуждения.

В статье Кристи (1833 г.) показано, что если R_x неизвестно, а $R_2 = R_1$, то выходное напряжение моста будет равно нулю, когда R_3 настроено равным переменному сопротивлению R_x . Во многих промышленных преобразователях используются мостовые схемы с одним или несколькими мостовыми сопротивлениями, которые зависят от переменных процесса, таких как температура, давление, деформация, влажность и т.д. В этих ситуациях преобразователи на основе мостовой топологии не могут быть идеально сбалансированы в полевых условиях; поэтому измеряются ненулевые выходные мостовые напряжения. В отличие от балансных измерений, возбуждение моста и сопротивление цепи будут вносить свой вклад в ошибки измерения.

Промышленные преобразователи с топологией мостовой схемы имеют наборы резисторов, которые уравнивают мост в каком-то состоянии, определяемом конкретным входным параметрическим полем. Когда эти параметры устойчивого состояния изменяются, мост становится несбалансированным, и выходной сигнал становится ненулевым.

Измерение этого напряжения разбаланса с применением соответствующего коэффициента является косвенным измерением переменной поля. Полезный диапазон этих напряжений определяется в промежутке от микровольт до милливольт; следовательно, необходимо использовать методы измерения низкого напряжения.

Уравнение 2 представляет собой выходное напряжение топологии мостовой схемы R -ом, показанной на рис. 1,

с возбуждением по напряжению, включая сопротивление цепи возбуждения.

$$V_{out} = \frac{V_{12}}{2} \times \left(\frac{R - R_x}{(R + R_x) + \left(\frac{r}{R}\right) \times (3R + R_x)} \right) \quad (2)$$

Если пренебречь сопротивлением цепи возбуждения, это уравнение сводится к:

$$V_{out} = \frac{V_{12}}{2} \times \left(\frac{R - R_x}{R + R_x} \right), \quad (2a)$$

где сопротивление цепи $r = 0$.

На рис. 2 представлен график выходных характеристик моста с типовым значением 120 Ом, схема которого была показана на рис. 1 (с переменным сопротивлением R_x). В этой модели возбуждение составляет 5 В постоянного тока, R_x находится в диапазоне от 20 Ом до 220 Ом, и используются три различных сопротивления линии возбуждения – ноль, 5 Ом и 20 Ом (нижняя кривая 1: сопротивление линии 0 Ом; средняя кривая 2: сопротивление линии 5 Ом; верхняя кривая 3: сопротивление линии 10 Ом). Сопротивлением выходной линии пренебрегают.

На основании данного графика и уравнения 2 можно сделать некоторые важные выводы о мостах, относящихся к категории 1:

- 1) выходные характеристики схемы чувствительны к сопротивлению линии возбуждения, а также к напряжению возбуждения – V_{12} ;
- 2) выходное напряжение моста является нелинейным для номинальных изменений R_x независимо от сопротивления линии возбуждения и напряжения возбуждения;
- 3) по мере уменьшения диапазона изменения R_x выходное напряжение моста начинает приближаться к нулю и становится более линейным.

На рис. 2а показано, что выходное напряжение моста по-прежнему остаётся линейным при очень небольших изменениях R_x и чувствительным к сопротивлению линии возбуждения.

Но может ли выходное напряжение мостовой схемы, показанной на рис. 1, стать линейным? Чтобы ответить на этот вопрос, уравнение 3 представляет собой частную производную выходного напряжения резистивного моста V_{out} в уравнении 2а по отношению к R_x (изменение V_{out} при изменении R_x), при этом все остальные переменные считаются постоянными и сопротивление линии возбуждения отсутствует.

$$\frac{\text{изменение } V_{out}}{\text{изменение } R_x} = V_{12} \times \frac{-R}{(R + R_x)^2} \quad (3)$$

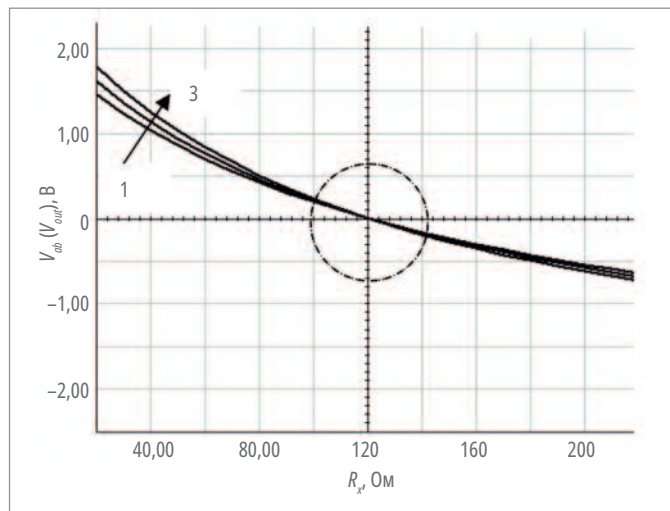


Рис. 2. Выходные параметры моста 120 Ом, напряжение возбуждения $V_{12} = 5$ В пост. тока при $20 \Omega < R < 220 \Omega$

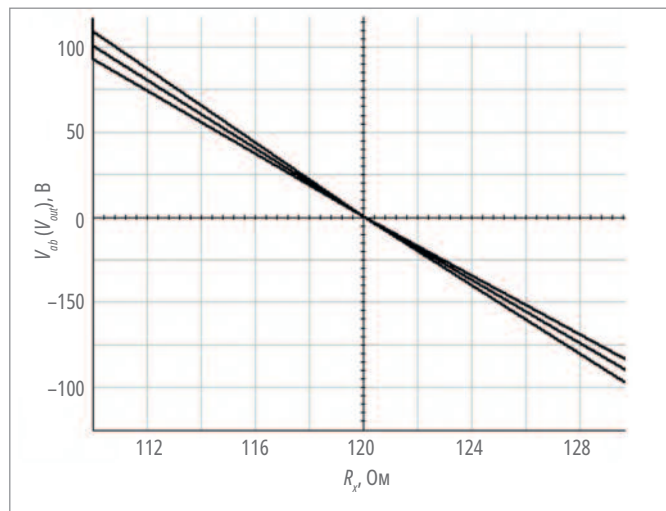


Рис. 2а. Увеличение площади, обведённой на рис. 2

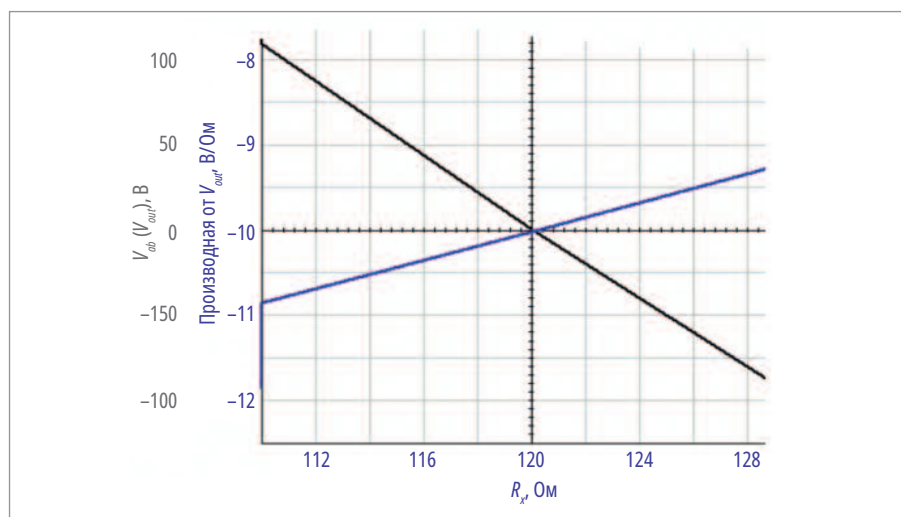


Рис. 3. Выходные параметры моста 120 Ом, чёрная линия: выходное напряжение моста 120 Ом, синяя линия: производная выходного сигнала моста от R_x

Ясно, что уравнение 3 является нелинейной функцией и непостоянной, что является условием, необходимым для того, чтобы V_{out} был линейной функцией от R_x . Таким образом, мостовые схемы, показанные на рис. 1, не могут иметь выходной сигнал, линейно зависящий от R_x (см. рис. 3).

Для R_x в диапазоне от 110 до 130 Ом изменения V_{out} с изменениями R_x (уравнение 3 и рис. 3) находятся в диапазоне от -11,3 до -9,6 мВ на Ом при среднем значении -10,5 мВ.

Однако использовать частные производные при расчёте выходных сигналов моста нецелесообразно. Общепринятой практикой является признание того, что мостовые схемы имеют нелинейные выходы, на которые влияет сопротивление линии возбуждения, и использование данных передаточной функции и инструкций по установке мостовых датчиков, указываемых непосредственно производителями.

Резистивный мост с токовым возбуждением

Уже более века используются мостовые схемы с возбуждением напряжением. На сегодняшний день, благодаря современным полупроводниковым технологиям, возможно также возбуждение от источника тока.

Уравнение 4 описывает выходной сигнал токового возбуждённого резистивного моста с пренебрежением сопротивлением линии выходного напряжения и при отсутствии сопротивления линии возбуждения.

$$V_{out} = (I_{exc} \times R) \times \left(\frac{R - R_x}{3 \times R + R_x} \right) \quad (4)$$

Уравнение 4 становится уравнением 4а, когда ток возбуждения устанавливается равным $I_{exc} = (V_{12} / R)$.

$$V_{out} = (V_{12}) \times \left(\frac{R - R_x}{3 \times R + R_x} \right), \quad (4a)$$

где $V_{12} = R \times I_{exc}$.

Здесь следует обратить внимание на сходство уравнений 2а и 4а.

Уравнение 5 представляет собой частную производную резистивного моста V_{out} в уравнении 4а по отношению к R_x (изменение V_{out} при изменении R_x), при этом все остальные переменные считаются постоянными.

$$\frac{\text{изменение } V_{out}}{\text{изменение } R_x} = - (V_{12}) \times \left[4 \times \frac{R}{(3 \times R + R_x)^2} \right], \quad (5)$$

где $V_{12} = R \times I_{exc}$.

На рис. 4 и 5 показано визуальное сравнение выходных напряжений резистивного моста категории 1 при возбуждении как по напряжению, так и по току.

На рис. 4 показаны характеристики мостовой схемы с сопротивлением 120 Ом, с возбуждением от источника тока на клеммах 1 и 2, где сопротивление линии равно нулю. Значение этого источника тока было выбрано равным 41,667 мА, что составляет 5 В постоянного тока / 120 Ом. Это значение тока обеспечивает возбуждение 5 В постоянного тока на клеммах моста, когда сопротивление R_x равно 120 Ом, что соответствует состоянию отсутствия параметрических входов поля.

На рис. 5 показано, что поведение выходного сигнала для моста сопротивлением 120 Ом, с током возбуждения, включающим различные сопротивления линии, равные нулю, 5 и 10 Ом, не зависит от сопротивлений линии возбуждения. При этом изменение $V_{вых}$ при изменении R_x варьируется от -10 до -10,8 мВ/Ом при среднем значении -10,4 мВ/Ом, примерно такое же, как и при возбуждении напряжением, но явно всё же не постоянное.

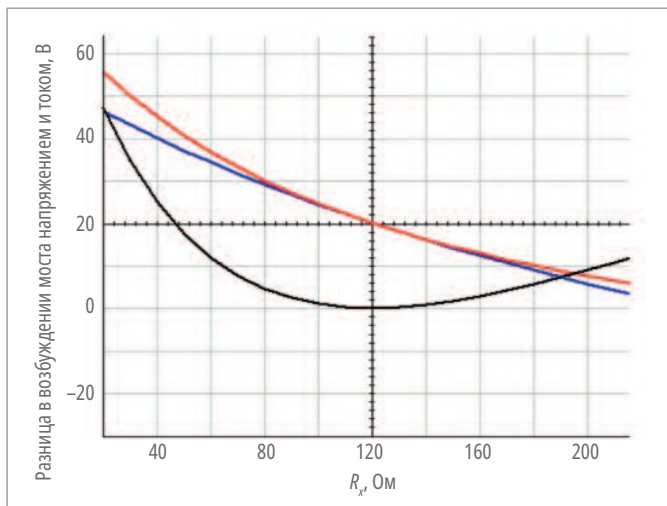


Рис. 4. Выходные параметры моста 120 Ом, красная кривая: напряжение возбуждения 5 В пост. тока, синяя кривая: ток возбуждения 41,67 мА, чёрная кривая: $V_{out}(E_{exc}) - V_{out}(I_{exc})$

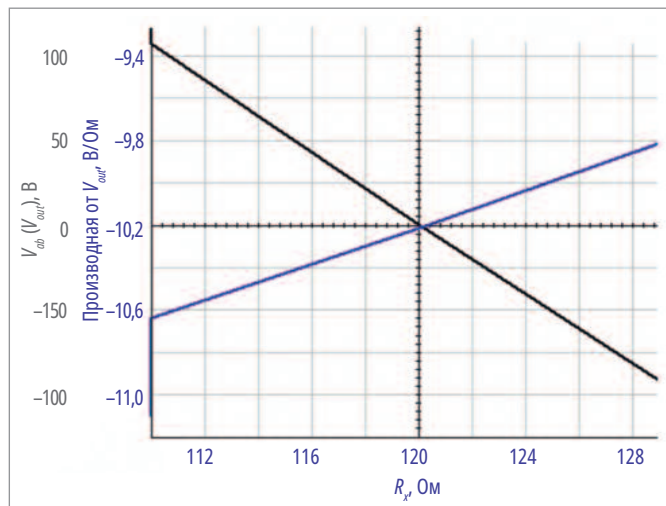


Рис. 5. Выходные параметры моста 120 Ом, чёрная линия: выходное напряжение моста 120 Ом, синяя линия: производная выходного сигнала моста от R_x

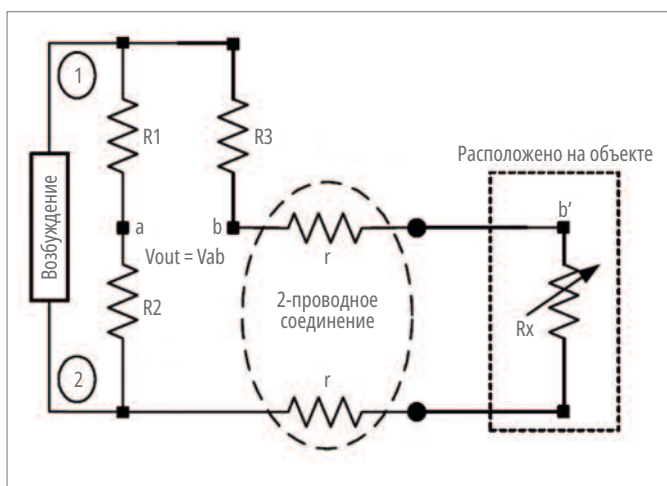


Рис. 6. Схема «четверть моста» с двухпроводным подключением

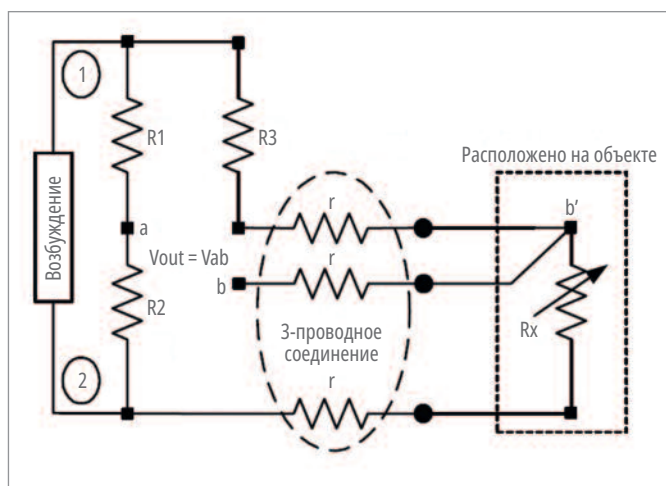


Рис. 7. Схема «четверть моста» с трёхпроводным подключением

Сравнение возбуждений резистивного моста категории 1

Выводы, приведённые ниже, основаны на схеме моста сопротивлением 120 Ом, показанной на рис. 1, с возбуждением напряжением 5 В постоянного тока или возбуждением током 41,67 мА, с включёнными сопротивлениями линии возбуждения 0, 5 и 10 Ом и пренебрежением сопротивлением линии выходного напряжения.

1. Уравнения 4, 4а и рис. 5 (чёрная кривая) показывают, что для токового возбуждения выход резистивного моста, не зависит от сопротивления линии возбуждения.
2. На рис. 4 показано, что если пренебречь сопротивлением линии, то выходной сигнал 4-проводного моста более линейный в широком диапазоне R_x для возбуждения по току (синяя кривая), чем для возбуждения по напряжению (красная кривая).

3. Уравнение 6 и рис. 4 (чёрная кривая) показывают, что выходные сигналы моста, проиллюстрированные возбуждением по напряжению (уравнение 2а) и возбуждением по току (уравнение 4а), по существу идентичны вблизи баланса. Вблизи баланса можно предположить, что $R \gg \Delta R$. Обратите внимание, что $R_x = (R + \Delta R)$, а I_{exc} определяется как V_{12} / R .

$$V_{out} \sim - \frac{V_{12}}{4} \times \left(\frac{\Delta R}{R} \right) \quad (6)$$

В типовых решениях тензодатчиков, где изменения R_1, R_x равны положительному значению, а изменения R_2, R_3 равны отрицательному значению, уравнение 6 принимает вид:

$$V_{out} \sim - V_{12} \left(\frac{\Delta R}{R} \right). \quad (6a)$$

Выбор схемы возбуждения

Сопротивления линий возбуждения по-разному влияют на выходные напря-

жения моста в зависимости от категории, к которой он относится (категория 1 или 2), и используемого источника возбуждения (ток или напряжение). На рис. 6 и 7 показано выходное поведение резистивных мостов категории 2 с одним резистором, расположенным в поле, подключённым к остальной части моста двумя и тремя проводами соответственно. Ниже приведены выражения выходного напряжения моста при условиях $R_1 = R_2 = R_3 = R$ и $R_x = (R + \Delta R)$. Возбуждение по напряжению равно V_{12} , а возбуждение по току I_{exc} , протекающему на клемму 1. Схема моста рассматривается всё та же, что на рис. 1, при этом не учитываются сопротивления линий выходного напряжения, а $R_x = (R + \Delta R)$.

Рис. 1. Уравнения (4-проводная схема категории 1)

Напряжение возбуждения V_{12} :

$$V_{out} = \frac{V_{12}}{2} \times \left(- \frac{\Delta R}{(2R + \Delta R) + r \times \left(4 + \left(\frac{\Delta R}{R} \right) \right)} \right).$$

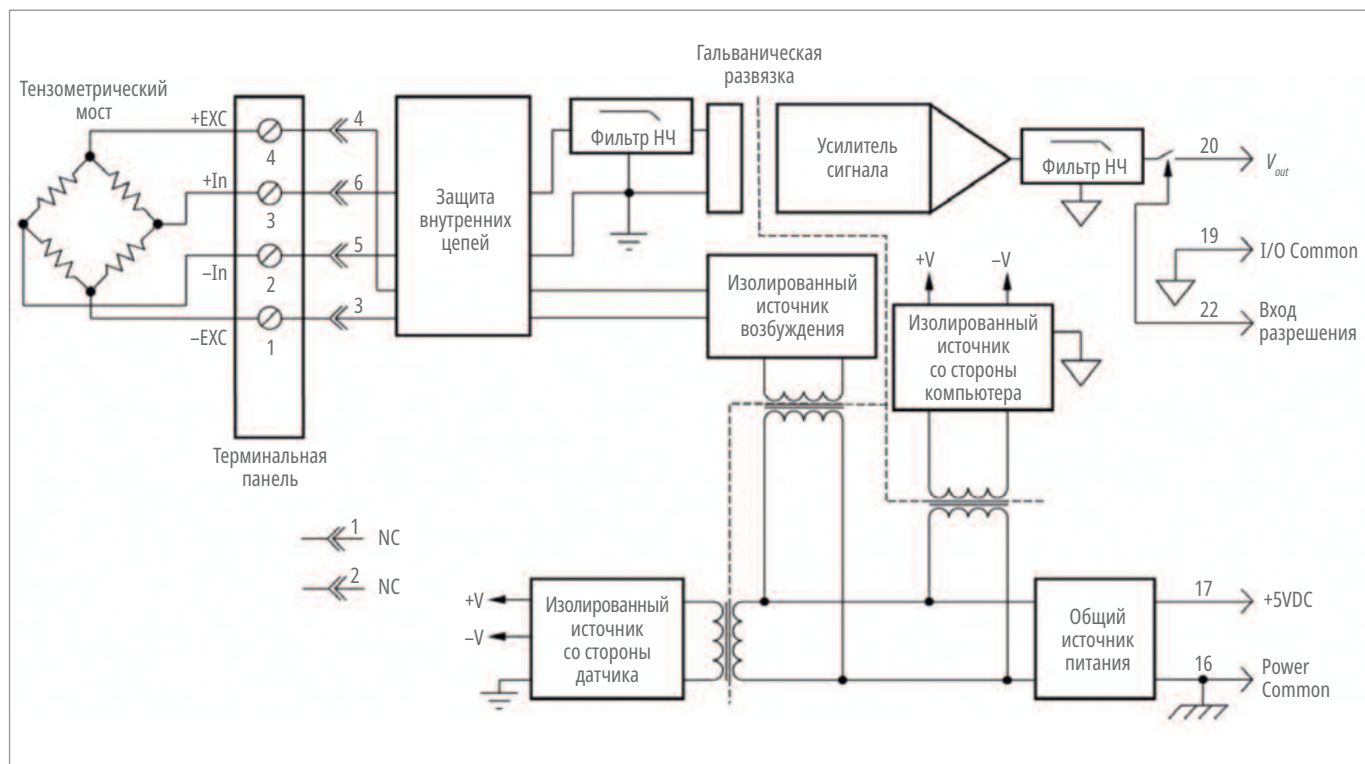


Рис. 8. Схема модуля формирования сигнала тензодатчика SCM5B38 (Dataforth)

Ток возбуждения, при $I_{exc} = V_{12}/R$:

$$V_{out} = \left(\frac{V_{12}}{2}\right) \times \left(-\frac{\Delta R}{2R + \left(\frac{\Delta R}{2}\right)}\right).$$

Рисунок 6.

Уравнения (2-проводная схема категории 2)

Напряжение возбуждения V_{12} :

$$V_{out} = \frac{V_{12}}{2} \times \left(\frac{-\Delta R - 2r}{2R + \Delta R + 2r}\right).$$

Ток возбуждения, при $I_{exc} = V_{12}/R$:

$$V_{out} = (V_{12}) \times \left(\frac{-\Delta R - 2r}{4R + \Delta R + 2r}\right).$$

Рисунок 7. Уравнения

(3-проводная схема категории 2)

Напряжение возбуждения V_{12} :

$$V_{out} = \frac{V_{12}}{2} \times \left(\frac{-\Delta R - r}{2R + \Delta R + 2r}\right).$$

Ток возбуждения, при $I_{exc} = V_{12}/R$:

$$V_{out} = V_{12} \times \left(\frac{-\Delta R - r}{4R + \Delta R + 2r}\right).$$

Выводы

На основе схем, приведённых на рис. 6 и 7, можно сделать следующие заключения:

- 1) выходное напряжение моста является нелинейной функцией от измеряемого параметра независимо от того, используется ли возбуждение током или напряжением;

- 2) при использовании токового возбуждения мостовая схема, относящаяся к категории 1, имеет выходные напряжения, которые не зависят от сопротивления линии;
- 3) выходные напряжения мостовой схемы категории 2 всегда зависят от сопротивления линии, независимо от того, используется ли возбуждение током или напряжением;
- 4) если ($r \ll \Delta R \ll R$), т.е. сопротивлением линии всегда можно пренебречь, и если изменения сопротивления R_x очень малы по сравнению с R , то выход моста одинаков как для возбуждения по напряжению, так и по току.

$$V_{out} = V_{12} \times \left(-\frac{\Delta R}{4R}\right),$$

$$V_{out} = I_{exc} \times \left(-\frac{\Delta R}{4R}\right), \text{ где } I_{exc} = V_{12}/R.$$

Ситуация, когда мостовая схема содержит более одного резистивного элемента с переменным сопротивлением при одинаковых по значению, но противоположных по знаку воздействиях, является обычной в мостовых измерениях.

Эти случаи обсуждаются в примечаниях по применению Dataforth для тензорезисторов.

На рис. 8 представлена блок-схема мостового модуля формирования сигнала Dataforth серии SCM5B38. Эти модули предназначены для взаимодей-

ствия с полными мостовыми схемами категории 1 с возможными опциями полумостовой и четвертьмостовой топологии категории 2. Преимущественное применение этого модуля приходится на промышленные тензоизмерительные приборы; тем не менее он хорошо подходит для любого контрольно-измерительного оборудования мостового типа.

Модули серии SCM, такие как SCM5B38, SCM5B38, имеют несколько (обычно 5–7) полюсных фильтров с фильтрацией помех на стороне поля. Кроме того, эти модули имеют четырёхстороннюю изоляцию, которая включает прецизионную развязку питания для возбуждения поля, изолированное питание со стороны поля, изолированное питание со стороны системы и непосредственно изоляцию самого сигнала. Также модули имеют как узкополосные, так и широкополосные встроенные фильтры, что, в свою очередь, позволяет использовать их в различных сферах автоматизации и измерения. Кроме того, серия DSCA38 имеет регулировку нуля и настроек диапазона в пределах $\pm 5\%$. Регулировка нуля особенно полезна для балансировки мостовых схем. ●

Автор – сотрудник фирмы ПРОСОФТ
Телефон: (495) 234-0636
E-mail: info@prosoft.ru

Первая 4,3" модель HMI в линейке cMTX от Weintek

Компания Weintek продолжает успешно расширять свою флагманскую серию панелей оператора cMTx. Для обеспечения потребностей рынка компания выпустила новую компактную панель с диагональю 4,3" – cMT2058X.

Несмотря на свои габариты, устройство обладает внушительными характеристиками, присущими всем панелям серии cMTx. Это высокопроизводительный четырёхъядерный RICS процессор, флеш-память объёмом 4 Гбайт и 512 Мбайт ОЗУ, высококачественная матрица с широким углом обзора 80° и разрешением 800×480.

При достаточно компактных размерах и толщине всего 32 мм панель может похва-



статься впечатляющим набором коммуникационных возможностей, подключение устройства возможно за счёт наличия двух Ethernet, последовательных RS-232, RS-485 портов и MPI интерфейса.

Помимо множества функций интеллектуального мониторинга, таких как VNC, WebView, cMT Viewer и удалённый мониторинг Weincloud, позволяющие повысить эф-

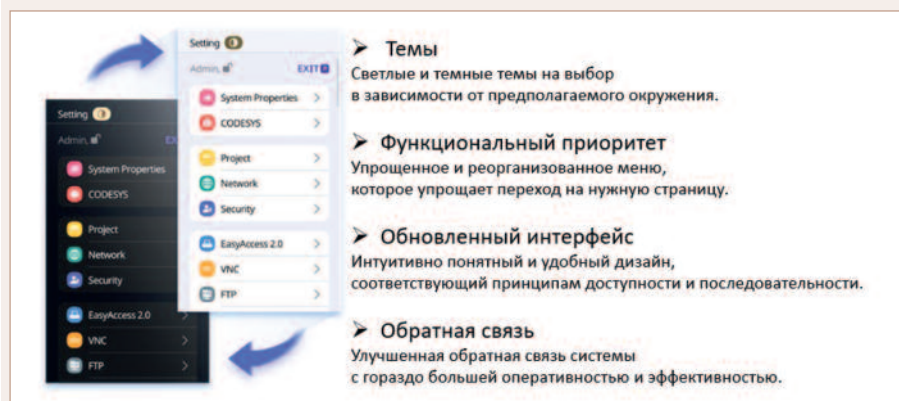
фективность работы с панелью, новая модель имеет совершенно новый интерфейс настройки системы. Тщательно разработанный с учётом пользовательского опыта обновлённый интерфейс стал более интуитивно понятным и удобным за счёт размещения часто используемых функций в верхней части меню, а также обеспечивая единообразный макет, стиль значков, использование шрифтов и цветов. Кроме того, различные подсказки об ошибках и индикаторы загрузки улучшают взаимодействие пользователя и системы.

Монтажные размеры выреза панели cMT2058XH идентичны всем существующим моделям Weintek других серий с диагональю 4,3 дюйма, что позволяет произвести замену без каких-либо модификаций. Программный переход также не представит сложности: пакет EasyBuilder Pro предоставляет специальные инструменты для плавной и бесшовной миграции проекта. ●



Таблица. Подробные характеристики cMT2058XH

Экран	4,3" Wide Viewing Angle (WVA)				
Разрешение	800×480				
Угол обзора	80/80/80/80				
Процессор	Quad-core RICS				
Flash/RAM	4 Гбайт / 512 Мбайт				
Ethernet	10/100/1000 Base-T×1				
	10/100 Base-T×1				
COM-порты	COM1: RS-232 / RS-485 2W/4W,				
	COM3: RS-485 2W				
MPI	Есть				
Габариты Ш×В×Г	128×102×32 мм				
Монтажный вырез	119×93 мм				
Изоляция питания, защитное покрытие платы	Да				
Рабочая температура	0...50°C (32...122°F)				
Корпус	Пластик				
Входное напряжение	24±20% VDC				
Вес	~ 0,27 kg				
	Программное обеспечение	EasyBuilder Pro	Версия V6.09.01 или позже		
		Weincloud	Dashboard	Опционально	
			EasyAccess 2.0	Опционально	
CODESYS®	Опционально				



Очередной выпуск слушателей семинара профессора G. Cockrell



14 мая в демонстрационном зале НИТ ГУАП состоялось заключительное семинарское занятие интернет-семинара «Управление проектами. Practical project management: learning to manage the professional» Почётного доктора ГУАП, Президента ISA 2008 года, профессора Gerald Cockrell (США). Профессор Cockrell уже в девятнадцатый раз провёл семинар. За эти годы свыше пяти сот студентов, аспирантов, преподавателей ГУАП и членов Санкт-Петербургской Российской секции ISA приняли в нём участие. Со словами благодарности к профессору обратились директор института технологий предпринимательства и права ГУАП профессор Будагов Артур Суменович и студенты – слушатели семинара.

От имени профессора G. Cockrell профессор Будагов А.С. вручил именные сертификаты слушателям семинара, успешно завершившим программу. ●