

СТРУКТУРНО-АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОРРЕКЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ В СОВРЕМЕННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ДАВЛЕНИЯ

А.Л. Виноградов, С.А. Голь, К.С. Устинов (ООО "КБМТ"),
В. Л. Федоров (ОАО "Теплоприбор")

Приведен обзор основных структурно-алгоритмических методов коррекции погрешностей, применяемых в современных измерительных преобразователях. Описан наиболее перспективный из них для разрабатываемого в рамках совместного проекта нового комплекса интеллектуальных преобразователей давления и расхода.

Предметом проектирования датчиков является обеспечение по возможности меньшей систематической и случайной погрешностей. Теоретически систематическая часть погрешности может быть скорректирована в электронной схеме измерительного преобразователя (ИП) благодаря подходящему методу. При этом максимально достижимый коэффициент компенсации ограничивается случайной погрешностью

$$k_{\max} = \frac{\Delta_c}{\Delta_0},$$

где Δ_c – суммарная систематическая погрешность,

Δ_0 – суммарная случайная погрешность.

Первичная электронная схема ИП предназначена для предварительной подготовки сигнала чувствительного элемента (ЧЭ): усиления и аналоговой фильтрации. Коррекция погрешностей происходит во вторичной электронной схеме с величиной, удобной для этого, например, с напряжением или цифровым кодом. Далее интерфейсная электронная схема переводит скорректированную величину в выходную, необходимую потребителю (например, ток), и содержит средства для обеспечения надежного транспорта информации.

Для коррекции систематической погрешности ИП в настоящее время применяют различные обобщенные структурные схемы.

При чисто аналоговой компенсации (рис. 1а) температурозависимые цепи R подключают к тензомосту (ТМ) и в цепь задания коэффициента усиления с целью устранения аддитивной (температурный дрейф начального сигнала), а также линейной и нелинейной мультипликативной (температурный дрейф чувствительности) составляющих погрешности, вызванной изменением температуры окружающей среды. На таком принципе основана коррекция в ИП "Сапфир-22Р", выпускаемых ОАО "Теплоприбор" (г. Рязань).

Примером так называемой пассивной термокомпенсации может служить датчик¹ X-ducer фирмы Motorola [1], схема которого представлена на (рис. 1б). Такие параметры, как смещение выходного сигнала при нижнем и верхнем значении диапазона измеряемого давления калибруются при изготовлении для обеспечения незначительного разброса характеристик от прибора к прибору. По сравнению с некомпенсированным датчиком пассивная компенсация сужает

примерно на порядок как аддитивную, так и мультипликативную составляющие зоны температурной погрешности, что подтверждает высокую эффективность такого решения. Кроме того, результирующая температурная зависимость выходного сигнала датчика близка к параболической, что позволяет проводить дополнительную цифровую коррекцию температурной погрешности по результатам всего трех значений температуры окружающей среды.

Отечественные разработки, использующие пассивную коррекцию на основе шунтирования плеча моста термозависимыми и термнезависимыми резисторами, представлены в [2].

Недостатком представленных на рис. 1 решений является высокая трудоемкость изготовления таких датчиков, связанная с тщательной ручной регулировкой или лазерной подгонкой корректирующих элементов. Следствием этого является низкая степень автоматизации градуировки ИП. К тому же различия температур-

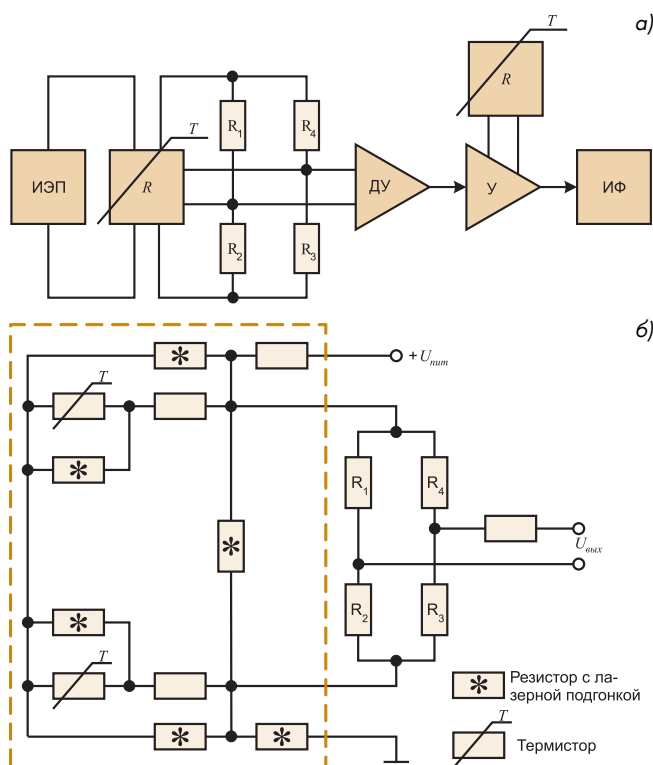


Рис. 1. ИП с аналоговой компенсацией:
а) структурная схема с активной компенсацией,
б) ЧЭ Motorola X-ducer с пассивной компенсацией

¹ Здесь и далее под термином "датчик" понимается конструктивно обособленный первичный измерительный преобразователь.

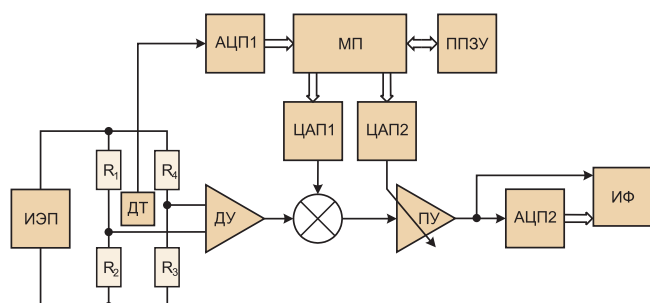


Рис. 2. ИП с цифроаналоговой компенсацией погрешностей

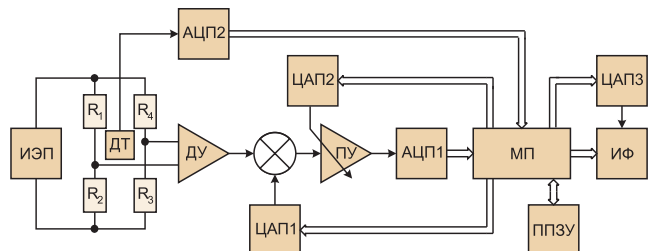


Рис. 3. ИП с динамической компенсацией погрешностей

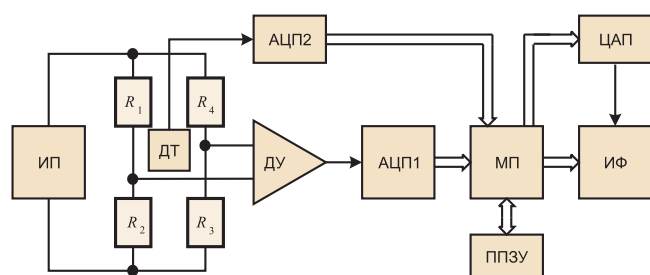


Рис. 4. ИП с цифровой компенсацией погрешностей

ных характеристик датчика и термисторов ограничивает возможность точной компенсации дополнительной погрешности в широком диапазоне температур.

Следует отметить, что эра чисто аналоговых приборов заканчивается, на смену приходят решения, основанные на микропроцессорной технике.

Решение, показанное на рис. 2, также представляет собой аналоговое преобразование сигнала, снимаемого с измерительной диагонали моста. Оно осуществляется с помощью программируемого усилителя (ПУ) (усилителя с регулируемым коэффициентом усиления). При этом в сумматоре усиленный сигнал складывается с сигналом смещения, формируемым программно с помощью калибровочных данных, записанных в энергонезависимую память (ППЗУ), а температурная компенсация осуществляется за счет дискретного регулирования коэффициента усиления. Для реализации такой структуры необходим датчик температуры (ДТ), сигнал которого подается на вход АЦП2, с выхода которого цифровой код, эквивалентный значению температуры T_M , поступает в микропроцессор. Измерительный сигнал с выхода ПУ может передаваться по аналоговому интерфейсу (например, по стандартной токовой петле 4...20 мА) или предварительно преобразованный в цифровой код АЦП2 – по цифровому интерфейсу (например, посредством интерфейса Foundation FieldBUS)

или по аналого-цифровому интерфейсу (например, посредством интерфейса HART).

Цифроаналоговая компенсация осуществляется, например, специализированными микросхемами серии MAX14xx [2] производства фирмы Maxim Integrated Products Inc. Причем, помимо описанных исполнительных элементов компенсации погрешностей они содержат регулируемые источники тока моста.

С целью получения наилучшего разрешения сигнала на выходе АЦП, значение сигнала на выходе датчика при изменении параметров рабочей, а также окружающей среды в допустимых пределах не должно быть меньше нижнего или больше верхнего опорного напряжения АЦП. К тому же индивидуальные значения параметров отдельных датчиков отличаются между собой, что при прочих равных условиях может быть причиной выхода сигнала с датчика за указанные пределы. Для преодоления этого снизу и сверху диапазона АЦП оставляют запас в определенное число бит для возможного дрейфа сигнала, что негативно сказывается на разрешении выходного сигнала АЦП.

Метод динамической компенсации позволяет сигналу датчика целиком заполнить диапазон АЦП. При этом становится возможным достижение более высокого разрешения и точности. Динамическая компенсация использует топологию с замкнутой петлей обратной связи [1] (рис. 3). Для динамической компенсации две петли обратной связи в РВ регулируют усиленный сигнал датчика. С помощью ЦАП первой петли обратной связи динамически поддерживают желательный уровень нулевого смещения. Вторая петля обратной связи обеспечивает динамическое управление коэффициентом усиления, чтобы регулировать и поддерживать желательный диапазон датчика. Поскольку сигнал датчика динамически компенсирован, не требуется никакого запаса в диапазоне АЦП.

На рис. 4 представлена структурная схема с цифровой реализацией компенсации погрешностей. Сигнал с ДТ реализуется для программной корректировки усиленного единственным в отличие от предыдущего решения дифференциальным усилителем (ДУ) и преобразованного в цифровой вид АЦП2 сигнала. При этом также используются калибровочные данные, записанные в энергонезависимую память МП. Выходная величина может быть снова преобразована в аналоговую или же передаваться в цифровом виде потребителю.

Примерами отечественных ИП с такой коррекцией могут служить датчики промышленной группы "Метран" (г. Челябинск) [3].

Случайная погрешность определяется, прежде всего, "зрелостью" применяемых технологий при производстве ИП давления, таких как равномерное гальваническое осаждение мембран, оптимальное размещение тензпреобразователей на мембране на основе сканирования ее поверхности, использование современных композитных материалов, менее чувствительных к влияющим факторам (температура окружающей среды, влажность) и т.д.

Особого внимания заслуживает решение компенсации погрешностей ИП немецкой фирмы asat gmbh [5], реализованное в специализированной интегральной микросхеме PS021. От уже описанных способов его отличает дополнительное промежуточное преобразование напряжения во временной интервал, и уже затем временной интервал преобразуется в цифровой код (рис. 5).

На каждом измеряемом тензорезисторе моста разряжается заряженный от источника напряжения конденсатор С. Время разряда конденсатора от начала до порога переключения компаратора, которое лежит в пределах 2...100 мкс, измеряется с высокой точностью преобразователем время-цифра (ПВЦ), имеющим разрешающую способность в 15 пс. Для измерения сопротивления тензорезистора осуществляется 8 циклов заряда/разряда конденсатора. Частота генератора частоты, управляющего коммутацией тензорезисторов, варьируется в пределах 2 Гц...50 кГц. Технологически необязательно использовать полный мост, можно ограничиться и полумостом, причем PS021 позволяет обслуживать до четырех полумостов одновременно. Этот способ выгодно отличает потребление электроэнергии PS021, включая ТМ, оно не превышает 100 мкА. Достижимая точность является сравнимой с высокоточными 24-битными АЦП. PS021 оснащена серийным интерфейсом, совместимым с SPI, для обмена данными с МП. Благодаря запатентованному техническому решению достигается высокая температурная стабильность, устраняются погрешности от внутренних сопротивлений формирователя и времени задержки компаратора. По сравнению с описанными способами исключаются погрешности усиления и опорного напряжения. Длина соединительных проводников между ТМ и PS021 может достигать 10 м.

Среди представленных актуальных на сегодня способов коррекции погрешностей ИП ООО "КБМТ" считает самым перспективным способ коррекции погрешностей ИП на основе адаптивно идентифицируемой функции коррекции, метода отрицательной обратной связи, интегрирования сигнала некомпенсации и метода вспомогательных измерений [6]. Благодаря использованию компенсационной схемы с полным уравниванием предлагаемый способ позволяет упростить функцию коррекции G. Это достигается тем, что в ней нет необходимости учитывать погрешности функциональных блоков ЦАП и преобразователя напряжение-ток (ПНТ), входящих в прямую цепь компенсационной схемы. Способ позволяет также уменьшить случайную составляющую погрешности за счет ее усреднения в результате интегрирования сигнала некомпенсации.

Первая попытка применения этого способа на практике сегодня успешно реализовалась в серийно выпускаемом ОАО "Теплоприбор" (г. Рязань) комплексе интеллектуальных ИП "Сапфир 22МР". Дальнейшим развитием потенциальных возможностей

Сознательная дисциплина - разве это не есть истинная свобода?

Н. К. Рерих

этого способа на практике является отдельный учет температурных составляющих погрешности измерительного (ИБ) и электронного (ЭБ) блоков в корректирующей функции G.

В связи с этим в настоящее время ООО "КБМТ" проводит опытно-конструкторскую разработку нового комплекса прецизионных интеллектуальных приборов для измерения давления и расхода жидких и газообразных сред, отличающихся высокими метрологическими функциональными, производственными и эксплуатационными характеристиками. [7]

Комплекс призван дополнить существующие в "Сапфир-22МР" конструктивные решения до универсальности, а именно обеспечить измерение/вычисление нескольких параметров (например, измерение избыточного давления, перепада давлений, температуры, вычисление расхода и т.п.). Благодаря разработанным ООО "КБМТ" и патентуемым в настоящее время схемотехническим решениям и алгоритмам измерения, ожидаемая основная погрешность измерительного преобразования составит 0,075%, а дополнительная составляющая погрешности от изменения температуры окружающей среды не превысит основной погрешности и при скорости изменения температуры окружающей среды не более 1 °С /мин составит 0,07 % от диапазона на каждые 10 °С.

ИБ ИП "Сапфир-22ИР" непосредственно контактирует с объектом измерения — жидкостью или газом в трубе или резервуаре, поэтому его температура может существенно отличаться от температуры ЭБ, который изолирован от объекта измерения. Для компенсации погрешностей измерения, вызванных двумя различными влияющими температурами, необходима четырехмерная корректирующая функция $G(F_2(J), T_{ИБ}, T_{ЭБ})$. Ее оценка построена из двух кусочно-линейных аппроксимаций (КЛА): первая относится к ИБ, вторая — к ЭБ. Температура ИБ снимается с диагонали питания ТМ, в ЭБ температура измеряется ДТ, встроенным в МК ADuC845.

Функциональная схема адаптивной идентификации параметров корректирующей функции представлена на рис. 6.

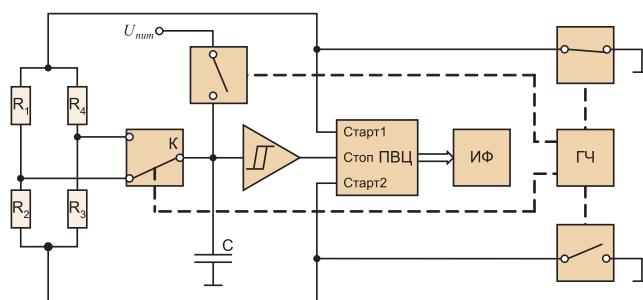


Рис. 5. Структура микросхемы PS021 немецкой фирмы asat gmbh

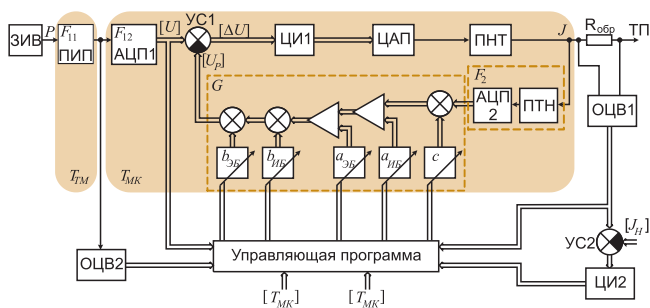


Рис. 6. Функциональная схема адаптивной идентификации параметров корректирующей функции с отдельным учетом температурных составляющих погрешности ИБ и ЭБ

Градуировка представляет собой поочередную настройку параметров соответствующих сегментов обих КЛА для каждого образцового значения, воспроизводимого задатчиком измеряемой величины при определенных значениях температуры, устанавливаемых внутри камеры холода и тепла (КХТ). Настройка каждого отдельного параметра принципиально ничем не отличается от того, как это осуществляется в ИП "Сапфир-22МР". При этом КЛА ЭБ рассматривается как часть корректирующей функции G , которая исключает систематические погрешности (включая и температурную составляющую) преобразования входного напряжения АЦП1 в выходной ток J с коэффициентом передачи $k_{u \rightarrow J}$. В качестве образцовых значений напряжений используются значения напряжения на выходе первичного измерительного преобразователя (ПИП), предварительно измеренные образцовым цифровым вольтметром ОЦВ2. КЛА ИБ в свою очередь исключает систематические погрешности, включая температурную составляющую преобразования давления P в выходное напряжение ПИП, а также задает ИП требуемый коэффициент передачи $k_{ИП}$.

Несмотря на двойное увеличение настраиваемых параметров корректирующей функции G , продолжительность градуировки возрастает лишь на 20...25%. Это связано с тем, что основную часть времени зани-

мает выход партии ИП на термоустановившийся режим в КХТ.

Раздельный учет температурных составляющих погрешности ИБ и ЭБ не потребует значительного технологического переоснащения производственного оборудования, используемого сегодня на ОАО "Теплоприбор" для производства ИП "Сапфир-22МР". Графический интерфейс модифицированного ПО АСУ градуировкой и поверкой ИП также не претерпит значительных изменений, что является немаловажным положительным фактором для наискорейшего ввода нового комплекса в серийное производство.

В разрабатываемом комплексе ИП "Сапфир-22ИР" предполагается применить стандарт полевой шины Foundation FieldBUS, а также исполнение, поддерживающее интерфейс RS-485.

Список литературы

1. Панфилов Д.И., Иванов В.С. Датчики фирмы MOTOROLA. М.: ДОДЭКА. 2001.
2. Мокров Е.А., Тихонов А.И., Герасимов О.Н. Коррекция аддитивной температурной погрешности тензорезистивных датчиков без дополнительной балансировки мостовой измерительной цепи // Датчики и системы "ДиС-2005": Сборник докладов Международной научно-технической конференции под ред. Мокрова Е.А. Пенза: ФГУП "НИИ физических измерений". 2005.
3. Алексеев В., Ламберт Е. Аналоговые устройства фирмы Maxim Integrated Products для нормирования сигналов датчиков // Компоненты и технологии. 2001. №3.
4. Юровский А.А., Ушаков Л.В. Датчики давления серии "Метран" – вчера, сегодня, завтра // Sensors & Systems. 2000. № 11 – 12.
5. PS021 acam. Digitale Losung fur Dehnungsmessstreifen. Datenblatt. PICOSTRAIN Hochgenaue Zeitdifferenzmessung 19. Май. 2005.
6. Голь С.А. Автоматизация градуировки интеллектуальных измерительных преобразователей давления // Автоматизация в промышленности. 2006. №11.
7. Виноградов А.Л., Румянцев С.В., Устинов К.С. Перспективы развития комплекса интеллектуальных приборов для измерения давления и расхода // Перспективные проекты и технологии. №1. 2006. Рязань: Издательство "РИНФО".

Виноградов Александр Леонидович – канд. техн. наук, доцент, директор,

Голь Станислав Артурович – ведущий инженер, **Устинов Константин Сергеевич** – ведущий программист

ООО "Конструкторское бюро микропроцессорной техники" (ООО "КБМТ"),

Федоров Владимир Леонидович – главный конструктор ОАО "Теплоприбор".

Контактный телефон (4912) 92-03-48.

Опытный образец комплекса телемеханики "Торнадо-ТМ" выдержал приемочные испытания

В Москве в сентябре 2006 г. прошло заседание Межведомственной комиссии (МВК) с участием специалистов ФСК, ВНИИЭ и СО под председательством главного специалиста Департамента технического обслуживания ИТС и СС ОАО "ФСК ЕЭС" А. К. Белотелова.

На рассмотрение комиссии был представлен опытный образец комплекса телемеханики "Торнадо-ТМ" в составе: устройства телемеханики КП "Торнадо-КП"; устройства вывода команд ТУ "Торнадо-ТУ"; центральной приемо-передающей станции "Торнадо-ЦППС"; АРМ дежурного на базе ПК, а также техническая до-

кументация, документы о внедрениях и сертификации комплекса. Специалисты ВНИИЭ и ЗАО "МСТ" совместно провели ряд дополнительных испытаний.

Опытный образец комплекса телемеханики "Торнадо-ТМ" успешно выдержал приемочные испытания, итогом которых стала рекомендация к постановке "Торнадо-ТМ" на производство в ЗАО "МСТ" и внесение его в Реестр электротехнического оборудования, допущенного к использованию в ОАО "ФСК ЕЭС" и на других электросетевых предприятиях. Комиссия особо отметила современный технический уровень выполнения устройства.

[Http://www.tornado.nsk.ru](http://www.tornado.nsk.ru)