

$$\Theta = (u_1, u_2, u_3, u_4). \quad (5)$$

2. Структурно-параметрическая оптимизация – определение оптимальных режимов технологического процесса из заданного набора оборудования при минимальных затратах. Для этой задачи сохраняется критерий оптимизации (3), ограничения (4), но к управлениям (5) добавляются связи между некоторыми элементами системы. Структура системы изменяется за счет возможности модернизации оборудования (связи (6–12), (7–13), (7–15)), а также из-за введения дополнительной абсорбции (связи (11 – 2), (14 – 5)). Вектор управлений имеет вид $\Theta = (u_1, u_2, u_3, u_4, \xi_{6-12}, \xi_{7-13}, \xi_{7-15}, \xi_{11-2}, \xi_{14-5})$, где $\xi_{i-j} = \{0,1\}$ – булевы переменные. Значения входных переменных системы выбираются из некоторых заданных диапазонов.

Решение сформулированных оптимизационных задач осуществляется с помощью прямых методов. Наилучшую эффективность при решении задач рассматриваемого типа показали генетические алгоритмы [4].

Требуемый уровень выходного значения температуры точки росы и диапазон исходной температуры газа определяется зимними или летними условиями. Для расхода газа задан отрезок $X_1 \in [0.5G_0; G_0]$, где величина G_0 соответствует оптимальному уровню загрузки технологического оборудования.

Для летнего режима работы получены оптимальные значения управлений, обеспечивающие ограничение по температуре точки росы при минимальных затратах: $\xi_{6-12} = 1; \xi_{7-15} = 1; \xi_{7-13} = 0; \xi_{11-2} = 0; \xi_{14-5} = 0$. Для зимнего режима работы:

$$\xi_{6-12} = 1; \xi_{7-15} = 1; \xi_{7-13} = 1; \xi_{11-2} = 1; \xi_{14-5} = 0.$$

Следовательно, структура технологического процесса, приемлемая в течение всего года, предполагает двухступенчатую схему осушки с модернизацией оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ланчаков Г.А., Ларюхин А.И., Дудов А.Н. и др. Опыт работы ООО Уренгойгазпром по повышению надежности и эффективности технологического оборудования установок осушки газа на Уренгойском АКМ. –М.: ИРЦ Газпром, 2001.
2. Стрижов И. Н., Ходанович И. Е. Добыча газа. –Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003.
3. Скобло А.И., Молоканов Ю.К., Владимиров А.И., Щелкунов В.А. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии: Учебник для вузов. — 3-е изд., перераб. и доп. –М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2000.
4. Сенюлов М.А., Тенев В.А. Интеллектуальные алгоритмы интерпретации геофизических исследований скважин. –СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004.

О.Н. Пьявченко, Е.В. Удод

ПОГРЕШНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

Точность – очень важная характеристика любого датчика. Правда, когда говорят о точности датчика, чаще всего подразумевают его неточность или погрешность измерений. Под погрешностью измерений, как правило, понимают величину максимального расхождения между показаниями реального и идеального датчиков [1].

Производители интеллектуальных датчиков давления делят погрешности на два типа: основную [2, 4], которую ещё называют базовой погрешностью системы, [5] и дополнительную [2]. Не все производители используют определение "допол-

нительная погрешность", большинство называют её погрешностью из-за влияния дополнительных факторов [3, 4, 5].

Составные части основной погрешности датчика давления у всех фирм производителей одинаковы, хотя зачастую встречаются расхождения в терминологии. Например:

- основная погрешность датчика включает погрешность нелинейности, гистерезис и повторяемость [2];
- точность – включает объединенное влияние линейности, гистерезиса и повторяемости. Точность включает остаточную погрешность усреднения нескольких последовательных измерений [3];
- точность приводится с учетом влияния нелинейности, вариации и воспроизводимости [4];
- базовая погрешность системы включает линейность, гистерезис и воспроизводимость [5].

Рассмотрим составляющие основной погрешности более детально.

Нелинейность определяется для датчиков, передаточную функцию которых возможно аппроксимировать прямой линией. Под нелинейностью понимается максимальное отклонение реальной передаточной функции от аппроксимирующей прямой линии. Под термином “линейность” на самом деле понимается “нелинейность” [1].

Воспроизводимость - это способность датчика при соблюдении одинаковых условий выдавать идентичные результаты. Воспроизводимость результатов определяется по максимальной разности выходных значений датчика, полученных в двух циклах калибровки [1].

Вариация выходного сигнала средства измерений - основание закона распределения случайной составляющей погрешности средства измерений от гистерезиса – разность между двумя математическими ожиданиями информативного параметра выходного сигнала средства измерений, получающимися при измерениях величины, имеющей одно и то же значение, с плавным медленным подходом к этому значению со стороны меньших и больших значений [6].

Приведём значения основной погрешности, взятой в процентах от верхнего предела измеряемого давления или, в некоторых случаях, от диапазона измеряемого давления, для некоторых интеллектуальных датчиков давления в табл. 1.

Таблица 1

Значения основных погрешностей

Серия датчиков давления.	Основная погрешность $\pm\gamma$ %
Метран – 100	0,1; 0,15; 0,25; 0,5; 1,0
Rosemount модель 4600	0,25
Druck RTX 1000	0,15; 0,075
Honeywell ST 3000® серия 100, модели для перепада давления	0,0875; 0,0625; 0,05; 0,175; 0,125

Примечание: Разные значений погрешностей в одной ячейке принадлежат разным моделям датчиков, принадлежащим одной серии.

Дополнительная погрешность средства измерений – разность (без учета знака) между значением погрешности, соответствующим некоторому заданному значению влияющей величины в пределах рабочих условий применения, и значением погрешности, соответствующим нормальному значению влияющей величины [6].

Сведём значения составляющих дополнительной погрешности для некоторых интеллектуальных датчиков давления в табл. 2.

Таблица 2

Значения дополнительных погрешностей

Воздействие	Погрешность ± %			
	Метран – 100	Rosemount 4600	Druck RTX 1000	Honeywell ST 3000® серия 100
Изменения температуры	<p>На каждые 10°C</p> $\pm(0,05+0,04 \frac{P_{max}}{P_v})$ $\pm(0,05+0,05 \frac{P_{max}}{P_v})$ $\pm(0,01+0,005 \frac{P_{max}}{P_v})$ $\pm(0,1+0,04 \frac{P_{max}}{P_v})$ <p>P_{max} – максимальный верхний предел измерений для данной модели датчика. P_v – верхний предел измерений модели, выбранный из ряда верхних значений пределов измерений.</p>	<p>изменение на 100 °F (56 °C)</p> <p>±0,03% от ВПД + 1,0% диапазона от 1:1 до 1:30</p> <p>ВПД–верхний предел давления</p>	<p>В диапазоне от -40 до +85°C при температуре калибровки +23°C.</p> <p>0,1%И + 0,2% ИВ+ +0,1% ВПИ; ±(0,5%ВПИ+1%И); ±(0,25%ВПИ+ +0,75%И); ±(0,5%ВПИ+1%И) ;</p> <p>И–интервал; ВПИ–верхний предел измерения</p>	<p>Совместное влияние температуры на нуль и шкалу, каждые 28°C (50°F)</p> <p>В цифровом режиме: ±0,4625% ±0,075% ±0,015% от шкалы</p>
Электромагнитные помехи:	<p>воздействие радиочастотного электромагнитного поля по ГОСТ Р 51317.4.3 0,1; 0,4</p> <p>----- остальные воздействия I</p>	<p>±0,15% диапазона при тестировании в полях частотой от 20 до 1000 МГц и напряженностью до 10 В/м.</p>	Нет данных	Нет данных
Вибрация	$\gamma_f = \pm 0,1 P_{max} / P_v \%$; $\gamma_f = \pm 0,25 P_{max} / P_v \%$; 	±0.1% от ВПД	Незначительное влияние при ускорении 5 g с частотой от 5 Гц до 2 кГц.	Нет данных
Долговременная стабильность	Нет данных	0.5% диапазона в течение 3 лет при нормальных условиях эксплуатации	±0,2% ВПИ за 5 лет	±0,01% ±0,015% ±0,04% ±0,03% от нижнего предела в год

Примечание: Разные значений погрешностей в одной ячейке принадлежат разным моделям датчиков, принадлежащим одной серии.

Из табл. 2 можно сделать выводы:

- подходы к определению дополнительных погрешностей у всех производителей датчиков давления различны. Кроме того, в зависимости от типа датчика могут появляться дополнительные погрешности, например на датчики дифференциального давления оказывает влияние статическое давление [2, 3];
- даже в современных интеллектуальных датчиках давления при изменении температуры в пределах рабочего диапазона дополнительные погрешности из-за воздействия температуры может превышать основную погрешность на порядок. Типичное значение дополнительной погрешности из-за влияния температуры, при изменении данного параметра в пределах рабочего диапазона, лежит в диапазоне от 1% до 2% [2, 3, 4, 5];
- остальные составляющие дополнительной погрешности также могут достигать, а иногда и превышать основную погрешность. Например, у модели для перепада давления датчика Honeywell ST 3000[®] серии 100 влияние статического давления на нуль и шкалу, на каждые 1000 пси (70 бар) может достигать 0,2% [3];
- ни один производитель датчиков давления не указывает **погрешность датирования отсчета аналого-цифрового преобразователя** или цифрового измерительного прибора. Погрешность датирования отсчета аналого-цифрового преобразователя или цифрового измерительного прибора – случайная величина – интервал времени, начинающийся в момент начала цикла преобразования (запуска) АЦП или ЦАП и заканчивающийся в момент, когда значение изменяющейся измеряемой величины и значение выходного цифрового сигнала на данном цикле преобразования оказались равны [6].

Некоторые современные производители датчиков давления вводят новую характеристику – общую погрешность прибора, которая определяет качество датчиков давления в условиях реального процесса. Например, для датчиков перепада давлений используется новое понятие обобщенная техническая характеристика, объединяющая основную погрешность, дополнительные влияния температуры окружающей среды и рабочего (статического) давления. Все эти параметры приводятся в рекламно-технических материалах производителей в виде формул и графиков [7]. Но в связи с тем, что этот новый параметр и у фирм производителей нет четкой договоренности какие погрешности и при каких условиях включать в эту характеристику применение данной оценки для сравнения существующих изделий ещё проблематичней, чем применение дополнительной погрешности.

Все интеллектуальные датчики давления имеют компенсацию температурной погрешности, хотя методы компенсации, применяемые в том или ином датчике в технической документации, не приводятся. Рассмотрим более подробно температурную погрешность датчиков давлений и способы её компенсации.

Снижение чувствительности измерительного преобразователя при повышении температуры вызвано в основном уменьшением сопротивлений полупроводниковых резисторов, образующих тензомост. Изменение температуры от минимального до максимального значения рабочего диапазона датчика давления без применения температурной компенсации может привести к изменению выходного напряжения датчика на 36%. [8].

Различают квазистатическое и динамическое воздействие температуры. Динамическое воздействие чаще всего оказывается со стороны измеряемой среды. Со стороны окружающей среды обычно имеет место квазистатическое воздействие температуры (медленно меняющееся со временем) [9]. В результате этих воздействий возникает температурная погрешность, состоящая из аддитивной и мультипликативной составляющей.

Аддитивная составляющая (температурный дрейф начального сигнала), определяемая разностью температурных коэффициентов сопротивления тензорезисторов в смежных плечах моста, в тензопреобразователе на основе «кремния на сапфире» в основном связана с температурными напряжениями сапфировой подложки, возникающими из-за разности коэффициентов температурного расширения сапфира и титана. Эта составляющая (по абсолютной величине) не зависит от выходного сигнала тензопреобразователя, так что ее вклад тем больше, чем меньше чувствительность тензопреобразователя к измеряемому давлению [10].

Мультипликативная составляющая (температурный дрейф чувствительности) связана с температурной зависимостью коэффициента тензочувствительности тензопреобразователя и упругих параметров титана и сапфира; ее относительная величина не зависит от выходного сигнала тензопреобразователя. Аддитивная составляющая температурной погрешности превосходит мультипликативную составляющую более чем в два раза. [10].

Можно выделить три основных группы методов уменьшения температурной погрешности применительно к аналоговым датчикам давления: конструктивную, схемную и конструктивно-схемную [9].

К конструктивным методам можно отнести метод, основанный на создании равенства усредненных температур для чувствительных элементов первичных преобразователей [9].

К схемным методам можно отнести метод, основанный на применении управляемого регулятора сигнала, на который поступает управляющий сигнал, полученный сравнением показателей двух терморезисторов находящихся в различных температурных условиях [9].

Конструктивно-схемные методы основаны на применении возможностей конструктивных и схемных методов [9].

Основные рекомендации, которые следует выполнять в целях уменьшения температурных погрешностей при разработке высокотемпературных и термоустойчивых датчиков давления, сводятся к следующему:

- конструкцию следует выполнять так, чтобы тепловое воздействие на элементы в цепи преобразования датчика было равномерным;
- не допускать возможности нагрева элементов конструкции датчика выше допустимой;
- стремиться использовать в электрических и контактных соединениях измерительных цепей датчика однородные металлы и сплавы, для контактных соединений металлы и сплавы с высокой электропроводностью;
- стремиться к уменьшению числа контактных соединений из разнородных материалов;
- концентрировать элементы измерительной цепи датчика в зонах равных температур, стремиться к концентрации их в одной точке;
- выбирать материалы с температурно-независимым модулем упругости или незначительно меняющимся в рабочем интервале температур;
- применять материалы с низким температурным коэффициентом сопротивления;
- выбирать материалы сопрягаемых элементов датчика по коэффициенту теплового расширения так, чтобы при тепловом воздействии на эти элементы не возникало деформаций (необходимо, чтобы выполнялось условие обеспечения равенства абсолютных изменений линейных размеров сопрягаемых деталей); применять материалы и вещества с низким коэффициентом объемного расширения [9].

В результате применения конструктивного, схемного и конструктивно-схемного методов компенсации можно добиться снижения аддитивной составляющей температурной погрешности в 20–25 раз, мультипликативной составляющей в 3–5 раз, что в результате даёт снижение температурной погрешности датчика давления примерно в 10 раз, то есть даже при применении наименее термочувствительных тензопреобразователей давления температурная погрешность при изменении температуры во всём рабочем диапазоне температур превышает 1% от верхнего предела давления [10].

Дополнительные возможности компенсации температурной погрешности даёт применение математических методов, реализованных на микропроцессорной технике, встроенной в интеллектуальный датчик давления.

Широкое применение нашёл способ коррекции датчиков по температуре, при котором характеристика датчика давления аппроксимируется полиномом, коэффициенты которого являются полиномами от температуры. Коэффициенты полиномов определяются по результатам экспериментов. Для достижения хороших результатов коррекции коэффициенты определяются индивидуально для каждого датчика [7].

Применение интеллектуальных технологий на основе микропроцессорной техники в современных датчиках давления позволило:

- реализовать широкий набор функций настройки и калибровки датчиков;
- повысить точность настройки и снизить суммарную погрешность измерений при работе датчика в реальных условиях эксплуатации;
- расширить диапазон возможных перенастроек;
- обеспечить непрерывную самодиагностику;
- использовать цифровые коммуникационные протоколы;
- осуществлять тестирование и управление параметрами датчика на расстоянии;
- выводить цифровые значения сигнала датчика на дисплей цифрового индикатора, встроенного в корпус электронного блока;
- с помощью встроенной кнопочной панели управления осуществлять:
 - контроль текущего значения измеряемого давления;
 - контроль настройки параметров датчика;
 - установку нуля;
 - настройку единиц измерения;
 - настройку времени усреднения выходного сигнала (демпфирования);
 - перенастройку диапазона измерений;
 - настройку на "смещенный" диапазон измерений;
 - выбор прямой, инверсной или корнеизвлекающей характеристики выходного сигнала;
 - калибровку датчика [2];
- добиваться снижения суммарной погрешности измерений при работе датчика в реальных условиях эксплуатации достигается автоматической компенсацией температуры окружающей среды и статического давления в трубопроводе [11].

В дальнейшем при развитии интеллектуальных технологий произойдёт усовершенствование вышеперечисленных функций, а также добавятся новые функции, которые приведут:

- к созданию адаптивных датчиков, то есть датчиков, которые в зависимости от текущей величины измеряемого параметра автоматически изменяют диапазон измерений [12];

- к созданию датчиков с расширенными возможностями архивации и обработки данных измерений, выполняющих функции обнаружения заданных событий и осуществления различных законов регулирования и логического управления [12];
- к созданию датчиков, определяющих и компенсирующих влияние электромагнитных наводок, а также плохих контактов в цепи путём применения проверки на достоверность;
- к созданию датчиков самостоятельно осуществляющих предварительную оценку состояния измеряемого параметра [13];
- к созданию датчиков, компенсирующих погрешность датирования.

С помощью математических и алгоритмических методов можно компенсировать:

- нелинейность, входящую в состав основной погрешности;
- увеличение нелинейности из-за изменения температуры;
- температурную погрешность из-за изменения свойств материала [7];
- погрешность датирования отсчета аналого-цифрового преобразователя или цифрового измерительного прибора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фрайден Дж.* Современные датчики. Справочник. – М.: Техносфера, 2005. 592 с.
2. <http://www.metran.ru/home/pr/pdf/1dd.pdf>
3. http://kip.industry.su/honeywell/Field_Instruments/Transmitters/Pressure/ST3000_DIFFERENTIAL/Rus/34-ST-03-60_R.pdf
4. <http://www.tek-know.ru/1/102.html>
5. www.emersonprocess.com/russia/files/4600_PDS_REV_AA_RUS.pdf
6. ГОСТ 8.009-84
7. <http://www.metran.ru/home/pr/pdf/leaflets/ddrosemount.pdf>
8. <http://chipinfo.ru/literature/chipnews/200105/3.html>
9. *Васильев В.А.* Методы уменьшения температурной погрешности датчиков давления. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2002. – №4–5. – С. 50–54.
10. *Мартынов Д.Б.* Стучебников В.М. Температурная коррекция тензопреобразователей давления на основе КНС. // Датчики и Системы. – 2002. – №10. – С. 6–12.
11. http://www.honeywell.ru/products/page3_2_7.shtml
12. *Винник Т.Л.* Современные технологии измерения температуры. // Мир измерений. – 2005. – № 3. – С. 4–11.
13. *Пьявченко О.Н.* Проектирование локальных микрокомпьютерных систем – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. 238 с.

В.Е. Золотовский, Д.В.Золотовский

ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ФУНКЦИЙ С АРГУМЕНТАМИ, ПРЕДСТАВЛЕННЫМИ ПОЛЯМИ

Основные трудности численного определения элементарных функций с аргументом, представленных полями, является переменная точность вычислений, связанная с изменением формата данных в зависимости от задачи. Под полем данного понимается число, разрядность которого значительно превышает разрядность слова (32бита) или двойное слово (64 бита). Для представления поля принято формирование его в виде набора групп по m – бит, как правило, группа имеет 8 или 16 бит. Это позволяет упростить схемы ускоренного переноса в группах. Операции над группами ведутся независимо [1].