

## МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 531.781.2

А.Н. Долгов

### ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ В ИНТЕГРАЛЬНЫХ ДАТЧИКАХ

Арзамасский политехнический институт (филиал) Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Применение связки датчик – вычислитель позволяет проводить коррекцию характеристик, хранить справочные данные, осуществлять самотестирование, автокалибровку, проводить предварительную обработку полезного сигнала и многое другое.

Рассмотрены особенности использования наиболее ресурсоемких из часто применяемых алгоритмов – коррекции характеристик, цифровой фильтрации и спектрального анализа.

Приведено типовое включение микроконтроллера как в чисто аналоговых датчиках, так и в датчиках с цифровым выходом прямого измерения и с отрицательной обратной связью, даны особенности применения.

Использование микроконтроллеров в интегральных датчиках позволяет улучшить их эксплуатационные свойства: повысить точность, облегчить интеграцию в систему, автоматизировать калибровку, тестирование и т.п. Кроме того, развитие интегральной электроники позволило массово производить дешевые контроллеры, поэтому следует ожидать увеличение доли "интеллектуальных" датчиков от общего количества.

*Ключевые слова:* интегральный датчик, интеллектуальный датчик, микроконтроллер в датчиках.

Современные датчики электрических величин представляют собой сложную систему разнородных компонентов – аналоговых и цифровых электронных схем, алгоритмов измерения и конструктивных элементов. Все чаще в них встраиваются микроконтроллеры, позволяющие за счет математической обработки информации непосредственно в процессе измерения и активного управления измерением значительно повысить точность [1]. В настоящее время потребность в так называемых "интеллектуальных" датчиках непрерывно увеличивается. Разумеется, никаким интеллектом такие приборы не обладают. Речь идет лишь о связке датчик – вычислитель. В качестве вычислителя может быть использована специализированная схема, программируемая логическая матрица и т.п., но чаще всего используется микроконтроллер. Преимущества, получаемые от использования микроконтроллера, связаны с привлечением вычислительных ресурсов в сам датчик. При этом обработка данных производится в самом датчике, т.е. становится распределенной, в отличие от централизованной, как в большинстве традиционных систем. "Интеллектуальный" датчик может быть динамически запрограммирован в зависимости от изменений в требованиях пользователя. Это позволяет уменьшить номенклатуру датчиков, увеличить программу выпуска и, как следствие, существенно снизить цену.

Применение цифровых методов обработки информации позволяет повысить качество измерений, и значительно расширить функции приборов.

Датчики давления, например, с микроконтроллерами выпускаются зарубежными компаниями Fisher–Rosemount, Honeywell, Endress & Hauser, Yokogawa, Valcom и рядом других [2–9]. Из предприятий СНГ следует отметить Метран, Манометр и Элемер [10–12].

Микроконтроллер – микросхема, предназначенная для управления электронными устройствами. Типичный микроконтроллер сочетает на одном кристалле функции процессо-

ра и периферийных устройств, содержит оперативное или/и постоянное запоминающее устройство. По сути, это однокристалльный компьютер, способный выполнять простые задачи.

Неполный список периферии, которая может присутствовать в микроконтроллерах, включает в себя:

- универсальные цифровые порты, которые можно настраивать как на ввод, так и на вывод;
- различные интерфейсы ввода-вывода, такие как UART, I<sup>2</sup>C, SPI, CAN, USB, IEEE 1394, Ethernet;
- аналого-цифровые (АЦП) и цифро-аналоговые (ЦАП) преобразователи;
- компараторы;
- широтно-импульсные модуляторы;
- таймеры;
- контроллеры прямого доступа к памяти
- контроллеры бесколлекторных двигателей;
- контроллеры дисплеев и клавиатур;
- радиочастотные приемники и передатчики;
- массивы встроенной флеш-памяти;
- встроенный тактовый генератор и сторожевой таймер.

В специализированных микроконтроллерах для обработки информации (цифровые сигнальные процессоры) могут быть аппаратно реализованы функции цифровой фильтрации, преобразования Фурье, перемножения векторов и т.п.

Применение вычислителя в интегральном датчике позволяет проводить коррекцию характеристик, хранить справочные данные, осуществлять самотестирование, автокалибровку, проводить предварительную обработку полезного сигнала и многое другое.

Коррекция характеристик может проводиться при наличии математической модели либо по табличным данным. В первом случае в качестве модели чаще всего используется разложение в ряд Лорана (первые несколько членов). На этапе калибровки снимается несколько точек фактической зависимости выходного сигнала от воздействующего фактора (полезный сигнал, температура, перекрестный сигнал). Затем аппроксимируют характеристику по предполагаемой модели (находят недостающие коэффициенты).

Чаще всего используется метод наименьших квадратов. Из получившейся полной модели выражают полезный сигнал. Этот способ чуть более сложен на этапе калибровки, однако, как правило, требует меньше ресурсов (памяти и вычислительных) при восстановлении полезного сигнала. При удачном выборе модели можно сократить количество точек калибровки и увеличить точность.

При втором способе также снимается несколько точек зависимости выходного сигнала, все они хранятся в памяти микроконтроллера.

Восстановление полезного сигнала чаще всего осуществляют с помощью кусочно-линейной аппроксимации (характеристика датчика между калибровочными точками считается линейной). Основной недостаток этого способа – при существенной нелинейности характеристики датчика требуется очень много точек калибровки, как следствие, большие трудоемкость калибровки и расход памяти микроконтроллера.

Предварительная обработка полезного сигнала чаще всего включает в себя цифровую фильтрацию либо спектральный анализ.

Линейный стационарный цифровой фильтр характеризуется передаточной функцией. Передаточная функция может описать, как он будет реагировать на входной сигнал. Таким образом, проектирование его состоит из постановки задачи (например, фильтр восьмого по-

рядка, нижних частот с конкретной частотой среза), а затем производится расчет передаточной функции, которая определяет его характеристики.

Передаточная функция фильтра имеет вид

$$H(z) = \frac{A(z)}{B(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_N z^{-N}}{a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_M z^{-M}}, \quad (1)$$

где порядок фильтра – большее из  $N$  или  $M$ ,  $z = \exp(sT)$ ;  $T$  - период дискретизации;  $s$  - оператор Лапласа.

Сигнал на выходе примет вид

$$y(k) = \sum_{i=0}^N b_i x(k-i) - \sum_{i=1}^M a_i y(k-i).$$

Цифровые фильтры бывают двух видов: с конечной импульсной характеристикой (нерекурсивные, знаменатель в (1) равен 1) и бесконечной (рекурсивные).

Таким образом, результат фильтрации – алгебраическая сумма, количество слагаемых напрямую зависит от порядка фильтра. С учетом того, что вычисления производятся с использованием дискретной математики, из-за ошибки округления применение фильтров высоких (более 8-го) порядков затруднено.

Преимущества цифровых фильтров перед аналоговыми:

- высокая точность (точность аналоговых ограничена допусками на элементы);
- стабильность (в отличие от аналогового передаточная функция не зависит от дрейфа характеристик элементов);
- гибкость настройки, лёгкость изменения;
- компактность – аналоговый на очень низкую частоту (доли герца, например) потребовал бы чрезвычайно громоздких конденсаторов или индуктивностей.

Недостатки цифровых фильтров по сравнению с аналоговыми:

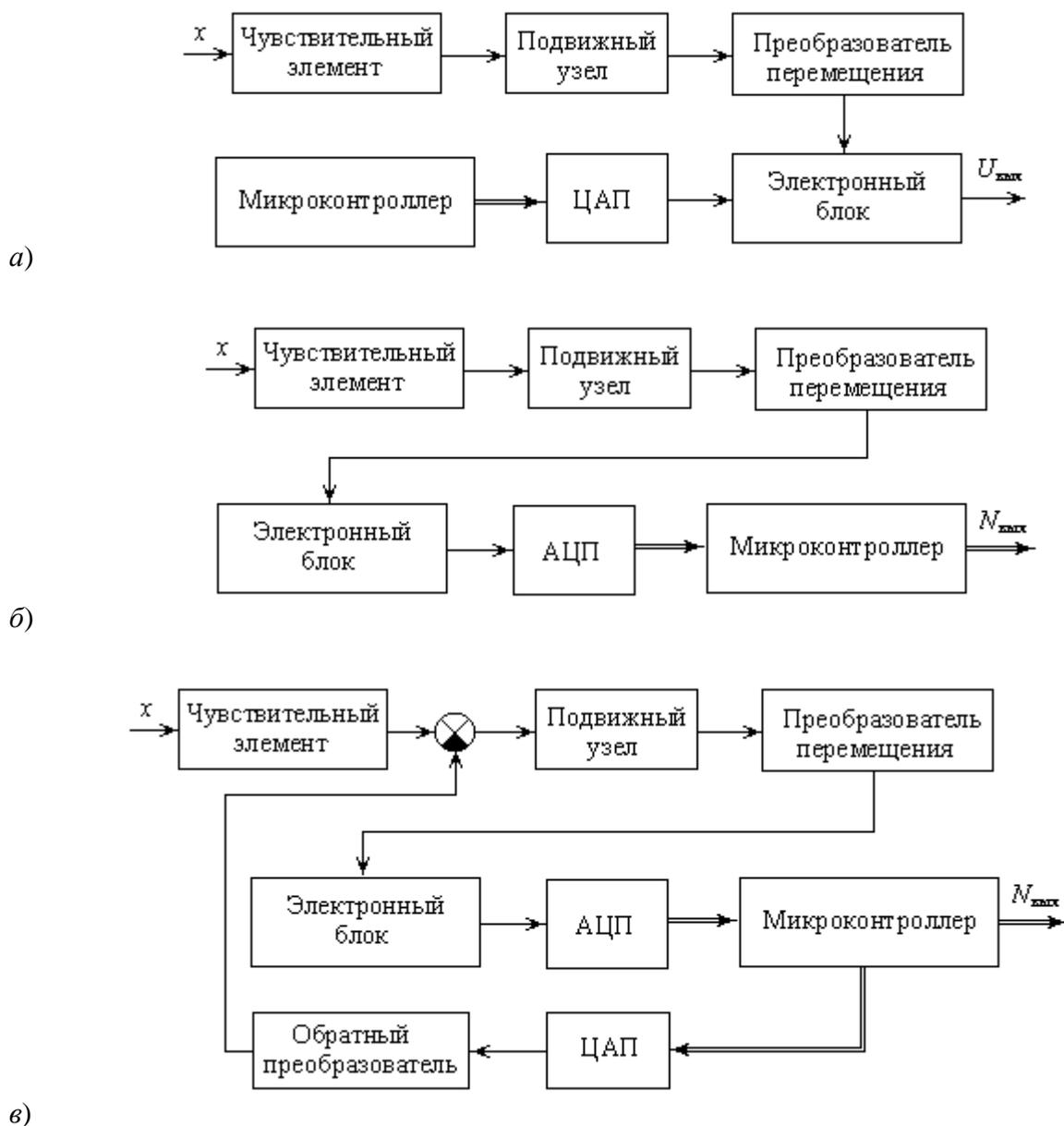
- трудность работы с высокочастотными сигналами. полоса частот ограничена частотой Найквиста, равной половине частоты дискретизации сигнала. поэтому для высокочастотных сигналов применяют аналоговые, либо, если на высоких частотах нет полезного сигнала, сначала подавляют высокочастотные составляющие с помощью аналогового, затем обрабатывают сигнал цифровым фильтром;
- большая загрузка ресурсов контроллера – вычисления должны быть завершены в течение периода дискретизации;
- для большой точности и высокой скорости обработки сигналов требуется не только мощный процессор, но и дополнительное, возможно дорогостоящее, аппаратное обеспечение в виде высокоточных и быстрых ЦАП и АЦП.

Спектральный анализ базируется на разложении периодической функции в ряд Фурье. Временной интервал для исследования спектра должен быть кратен периоду сигнала. Выполнить это условие для реальных сигналов удается редко. На практике, чтобы снизить погрешность, выбирают временной интервал (окно преобразования) много больше максимального периода входного сигнала. Для экономии вычислительных ресурсов в качестве основного алгоритма используют быстрое преобразование Фурье – разновидность дискретного преобразования Фурье. В нем интегрирование заменяют суммированием, количество отсчетов (отрезков дискретизации по времени) обычно выбирают равным степени 2. Увеличение скорости преобразования происходит за счет снижения точности. Однако снижение точности из-за упрощенности алгоритма можно компенсировать увеличением количества отсчетов в окне преобразования.

Микроконтроллер может использоваться как в чисто аналоговых датчиках (рис. 1, а), так и в датчиках с цифровым выходом прямого измерения (рис. 1, б) и с отрицательной об-

ратной связью (рис. 1, в) [13]. На рисунке показаны лишь те цепи, что напрямую влияют на прохождение сигнала.

Первый вариант может использоваться, например, для коррекции температурной погрешности, если требуется именно аналоговый сигнал на выходе. Следует обратить внимание, что математическая модель такого датчика будет более сложной, чем аналогичного без контроллера. Другими словами, если предполагается использование в системе с вычислителем, использующей свои алгоритмы улучшения точности, следует отдавать предпочтение датчику без внутренней коррекции.



**Рис. 1. Включение микроконтроллера в состав интегрального датчика. Аналоговый датчик (а), с цифровым выходом прямого измерения (б), с отрицательной обратной связью (в)**

Второй вариант достаточно популярен из-за простоты реализации: датчик с цифровым выходом подключается через микроконтроллер к потребителю.

В последнем случае погрешность АЦП практически не влияет на точность датчика, но цифровая часть вносит задержку в обратную связь, как следствие, необходим дополнитель-

ный анализ устойчивости. Для улучшения динамики можно добавить корректирующее устройство в обход цепочки АЦП–микроконтроллер–ЦАП.

Необходимо отметить появление специфических цифровых шумов из-за дискретного представления информации, импульсных помех на выходе ЦАП при изменении кода, а также по питанию от цифровых схем. Методы борьбы (фильтрация, раздельное питание цифровой и аналоговой части, экранирование) позволяют лишь снизить влияние шумов, но не устранить.

### Вывод

Использование микроконтроллеров в интегральных датчиках позволяет улучшить их эксплуатационные свойства: повысить точность, облегчить интеграцию в систему, автоматизировать калибровку, тестирование и т.п. Кроме того, развитие интегральной электроники позволило массово производить дешевые контроллеры, поэтому следует ожидать увеличение доли "интеллектуальных" датчиков от общего количества.

### Библиографический список

1. **Шишов, О.В.** Интеллектуальные датчики в системах промышленной автоматизации // Электроника и информационные технологии. Электронное научное периодическое издание
2. url: [http://fetmag.mrsu.ru/2011-2/pdf/smart\\_sensors.pdf](http://fetmag.mrsu.ru/2011-2/pdf/smart_sensors.pdf) (дата обращения: 17.05.15)
3. url: [www.tek-know.ru](http://www.tek-know.ru)
4. url: [www.emersonprocess.com](http://www.emersonprocess.com)
5. url: [www.mks-instruments.com](http://www.mks-instruments.com)
6. url: [www.all-impex.ru](http://www.all-impex.ru)
7. url: <http://fisher-rosemount.nm.ru/>
8. url: <http://www.endress.com/>
9. url: <http://www.yokogawa.ru/>
10. url: <http://www.valcom.ru/>
11. url: <http://www.metran.ru/>
12. url: <http://www.manometr.com/>
13. url: <http://www.elemer.ru/>
14. Схемотехника интегральных датчиков: учеб. пособие / А.Н. Долгов; под ред. В.Д. Вавилова; Нижегород. гос. ун-т. им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2013. – 129 с.

*Дата поступления  
в редакцию 19.06.2015*

**A.N. Dolgov**

### THE USE OF MICROCONTROLLERS IN INTEGRATED SENSORS

Arzamas polytecnic institute (branch)  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

**Purpose:** Goal of this paper is to provide a basis for the design of sensors containing a processor.

**Findings:** In this article shown the basic use of the microcontroller in the sensor, are given features of they application. There described the features of the most useful algorithms for sensors.

**Application:** The present article provides a starting-point for design advanced integral sensor.

**Conclusion:** Using a microcontroller integrated in the sensor allow enhance performance characteristics: increase the accuracy, simplify the integration in the system, automate calibration, testing, etc.

*Key words:* integral sensor, sensor intelligence, microcontroller in sensors.