

Интегральные датчики температуры

фирмы National Semiconductor

Интегральные датчики температуры (ИДТ) являются неотъемлемой частью практически любого современного электронного устройства. С одной стороны, это связано с необходимостью обеспечения требуемых характеристик аппаратуры в широком диапазоне температур, а с другой — с проблемой обеспечения оптимального теплового режима элементов и защиты их от перегрева. Отличительной особенностью ИДТ по сравнению с традиционными термодатчиками (термисторами, термопарами и др.) является сравнительная простота их использования — они не требуют линеаризации и компенсации холодного спада, что делает весьма целесообразным их применение во всевозможных термометрах и терморегуляторах. Последнее поколение ИДТ со специализированными цифровыми интерфейсами, так называемые интеллектуальные ИДТ (Smart Temperature Sensor), широко применяются для стабилизации тепловых режимов вычислительных систем, измерительной аппаратуры и в технике радиосвязи. Фирма National Semiconductor (www.national.com) — один из ведущих мировых производителей интегральных датчиков температуры различных типов [1], которые в огромных количествах используются в различных изделиях электронной техники, выпускаемых в разных странах, в том числе и в России.

Геннадий Штрапенин,
к. ф.-м. н.

gshtrapenin@electron.usurt.ru

Физическая основа работы ИДТ заложена в температурной зависимости падения напряжения на прямо смещенном кремниевом p-n-переходе, которая выражается хорошо известной формулой

$$U = (kT/q) \times \ln(I/I_s),$$

где U — напряжение на переходе, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, q — заряд электрона, I — ток через переход, I_s — обратный ток насыщения, величина которого зависит от конфигурации и температуры перехода. Отметим, однако, что вышеприведенную зависимость непосредственно использовать для точного измерения температуры нельзя по двум причинам. Во-первых, существует значительный разброс «начального» прямого падения напряжения на переходе, связанный с технологией его изготовления, а во-вторых, существенный вклад в зависимость $U(T)$ вносит температурная зависимость I_s . В связи с этим для измерения температуры в ИДТ используют разность напряжений двух p-n-переходов, а точнее, напряжений базэмиттер ΔU_{BE} двух транзисторов VT1 и VT2, которая может быть определена из выражения

$$\Delta U_{BE} = U_{BE1} - U_{BE2} = (kT/q) \times \ln(J_{E1}/J_{E2}),$$

где J_{E1} и J_{E2} — плотность тока эмиттеров транзисторов. Эффекты, связанные с током насыщения и начальным падением напряжения на p-n-переходах при этом компенсируются, и температурная зависимость становится линейной с высокой точностью. В реальных устройствах используют транзисторы с разными площадями эмиттерных переходов, что обеспе-

чивает заданное соотношение плотностей тока эмиттеров, или набор одинаковых транзисторов, соединенных параллельно, — так называемую ячейку Брока (Brokaw Cell) [2]. Практическая схема измерения температуры с температурным коэффициентом выходного напряжения $10 \text{ мВ/}^\circ\text{К}$ приведена на рис. 1. Требуемое значение коэффициента достигается определенным соотношением сопротивлений резисторов $26R$ и $23R$. Резистор $100R$, используется для точной калибровки датчика. Данная схема применяется в популярных микросхемах ИДТ LM135 — LM335 (отечественный аналог К1019ЕМ1), которые будут подробно рассмотрены ниже.

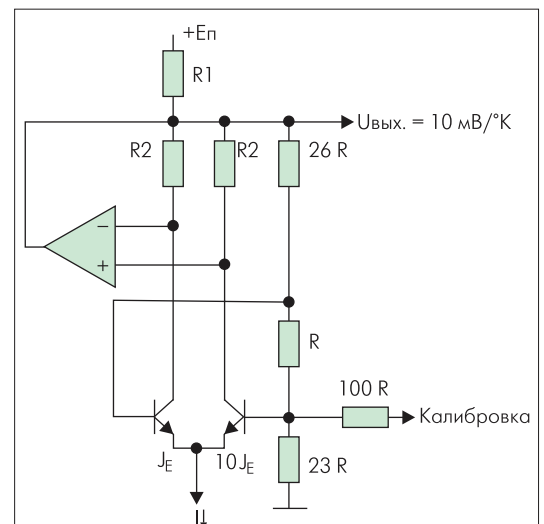


Рис. 1. Схема для измерения температуры по разности напряжений эмиттерных переходов транзисторов

Дальнейшее совершенствование интегральных датчиков температуры было направлено на повышение линейности и точности измерений. Появились также специализированные микросхемы — контроллеры для работы с удаленными термочувствительными элементами (диодами или транзисторами), которые могут располагаться непосредственно в контролируемом устройстве, например микропроцессоре. В этом случае микросхема-контроллер проводит поочередное измерение выходных напряжений сенсора при двух заданных значениях тока, а затем расчет разности этих напряжений и температуры согласно приведенным формулам.

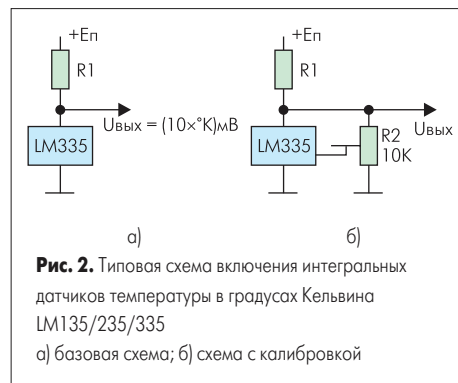
Максимальный диапазон температур, перекрываемый интегральными полупроводниковыми датчиками, составляет от -60 до +200 °С, минимальная погрешность измерений зависит от диапазона измеряемых температур и может составлять менее десятых долей градуса. Следует отметить, что точность измерения температуры зависит от типа корпуса датчика, его конструктивного выполнения и размещения в системе. На результаты измерений влияет также собственное тепловыделение ИДТ, определяемое приложенным к нему напряжением и потребляемым током.

Перейдем теперь к рассмотрению доступных интегральных термодатчиков National Semiconductor (табл. 1). Выпускаемые в настоящее время приборы можно условно разделить на две группы. Первая из них — датчики с аналоговым выходом, величина напряжения на котором пропорциональна измеряемой температуре в градусах Кельвина или Цельсия (в последнем случае для корректного отсчета отрицательной температуры требуется двухполярное питание ИДТ или к выходному напряжению датчика, пропорциональному измеряемой температуре, прибавляется некоторое постоянное число). Вторая группа — ИДТ с цифровым выходом, в простейшем варианте это может быть выход одно- или двухпорогового компаратора, переключающегося, когда измеренная величина температуры выходит из области заданных значений. Датчики такого типа широко используются в различных термостабилизирующих устройствах. Цифровой выход большинства современных ИДТ выполняется в виде последовательного интерфейса, наиболее распространены двухпроводной I²C и трехпроводные SPI и MICROWARE. Соответствующее программное обеспечение, необходимое для работы таких датчиков, имеется на сайте фирмы.

Мы начнем рассмотрение с прецизионных датчиков температуры в градусах Кельвина с аналоговым выходом LM135, LM235 и LM335. Особенность данных приборов — двухпроводное включение по схеме, аналогичной стабилизатору. Типовое решение для использования ИДТ LM135/235/335 приведено на рис. 2а. При величине тока через датчик от 0,4 до 5 мА, задаваемой внешним резистором R1, выходное напряжение с высокой точностью равно 10×°К мВ. При необходимости возможна точная калибровка датчика, для этого используется третий вывод и внешний подстроечный резистор, как показано на рис. 2б. При температуре 25 °С им выставляется выходное напряжение датчика 2,982 В. ИДТ LM135/235/335 выпуска-

Таблица. Основные параметры интегральных датчиков температуры National Semiconductor

Тип	Диапазон температур		Тип выхода	Температурный коэффициент		Дискретность	Напряжение питания		Потребляемый ток	Погрешность	Примечание
	°С			мВ/°С	°С		В				
	мин	макс					тип	тип			
LM135	-55	+150	Аналоговый	10,0			шунт	макс	5,0	±1; ±1,5	Прецизионный, U _{вых} , мВ = 10 · °К
LM235	-40	+125	Аналоговый	10,0			шунт	макс	5,0	±1; ±1,5	То же
LM335	-40	+100	Аналоговый	10,0			шунт	макс	5,0	±1; ±2	То же
LM35	-55	+150	Аналоговый	10,0			4,0	30	0,13	±1; ±2	Прецизионный, U _{вых} , мВ = 10 · °С
LM45	-20	+100	Аналоговый	10,0			4,0	10	0,16	±3,5; ±4	То же
LM50	-40	+125	Аналоговый	10,0			4,5	10	0,18	±3; ±4	Однопол. питание, U _{вых} , мВ = 10 · °С + 500
LM60	-40	+125	Аналоговый	6,25			2,7	10	0,12	±3; ±4	Однопол. питание, U _{вых} , мВ = 6,25 · °С + 424
LM62	0	+90	Аналоговый	15,6			2,7	10	0,16	±2	Однопол. питание, U _{вых} , мВ = 15,6 · °С + 480
LM20	-55	+130	Аналоговый	-11,7			2,4	5,5	0,01	±2,5; ±5	Микромощный, U _{вых} , мВ = -11,7 · °С + 1864
LM56	-40	+125	Компаратор	6,2			2,7	10	0,23	±3; ±4	Прецизионный термостат с двумя выходами
LM70	-55	+150	Цифровой			0,25	2,7	5,5	0,49	±2	10-Bit+знак, интерфейс SPI/MICROWARE
LM74	-55	+150	Цифровой			0,0625	3,0	5,5	1,0	±1,25	12-Bit+знак, интерфейс SPI/MICROWARE
LM75	-55	+125	Цифровой			0,5	3,0	5,5	0,25	±3	10-Bit, интерфейс I ² C, сигнал OverTemper
LM76	-55	+150	Цифровой			0,0625	3,0	5,5	0,50	±1	12-Bit+знак, Интерфейс I ² C, сигналы OverTemper и OverWin
LM77	-55	+125	Цифровой			0,5	3,0	5,5	1,0	±3	То же, 9-Bit+знак



ются с обычной и повышенной точностью (LM135A/235A/335A) в герметичных транзисторных корпусах TO-46 (LM135H/235H/335H и LM135AH/235AH/335AH), а LM335 — также в пластмассовом корпусе TO-92 (LM335Z и LM335AZ) и SO-8 для поверхностного монтажа (LM335M).

Трехвыводные прецизионные интегральные датчики температуры в градусах Цельсия с аналоговым выходом LM35 и LM45 не требуют калибровки и работают в широком диапазоне питающих напряжений. Типовая схема включения ИДТ LM35 для измерения положительных температур приведена на рис. 3а, а для всего диапазона температур — на рис. 3б. Небольшая величина потребляемого тока (реально 60 мкА) уменьшает погрешность измерений из-за саморазогрева датчика. ИДТ LM35 выпускаются в различных модификациях по диапазону температур: от -55 до +150 °С (LM35, LM35A), от -40 до +110 °С (LM35C, LM35CA) и от 0 до +100 °С (LM35D); точности: 1 °С (LM35A и LM35CA), 2 °С (LM35, LM35C, LM35D); и в четырех типах корпусов: TO-46 (LM35H, LM35AH, LM35CH, LM35CAH и LM35DH), TO-92 (LM35CZ, LM35CAZ и LM35DZ), TO-220 (LM35DT) и SO-8 (LM35DM). Точность датчика LM45B составляет 3 °С, а LM45C — 4 °С в диапазоне температур от -20 до +100 °С. Эти термодатчики выпускаются в корпусе SOT-23.

Аналогичные параметры имеет и интегральный термодатчик LM50, отличительная особенность которого — смещение выходного напря-

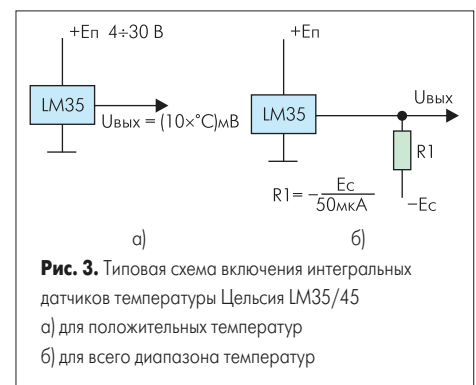
жения на +500 мВ, что дает возможность обойтись однополярным питанием во всем диапазоне измеряемых температур. LM50 выпускается в двух модификациях: LM50B — диапазон измеряемых температур от -25 до +100 °С, точность измерений 3 °С; и LM50C — от -40 до +125 °С, 4 °С соответственно.

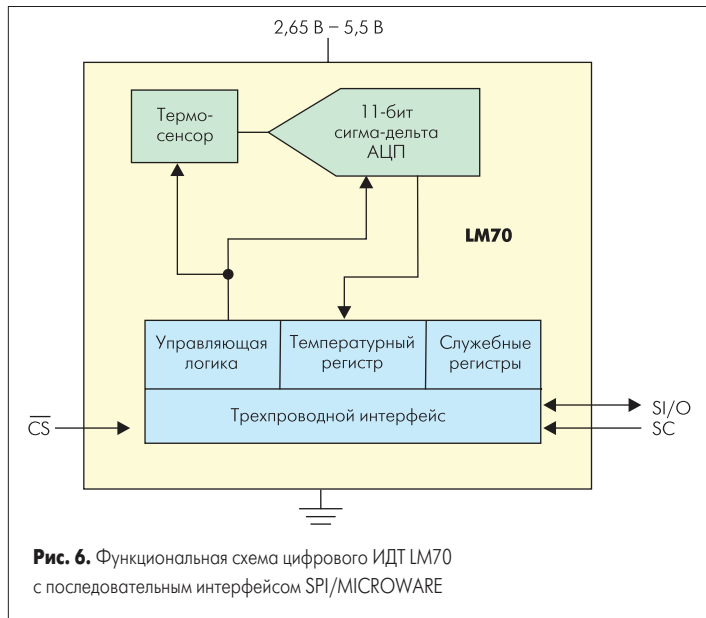
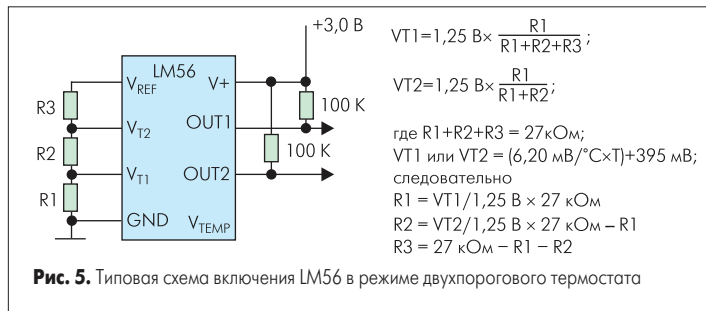
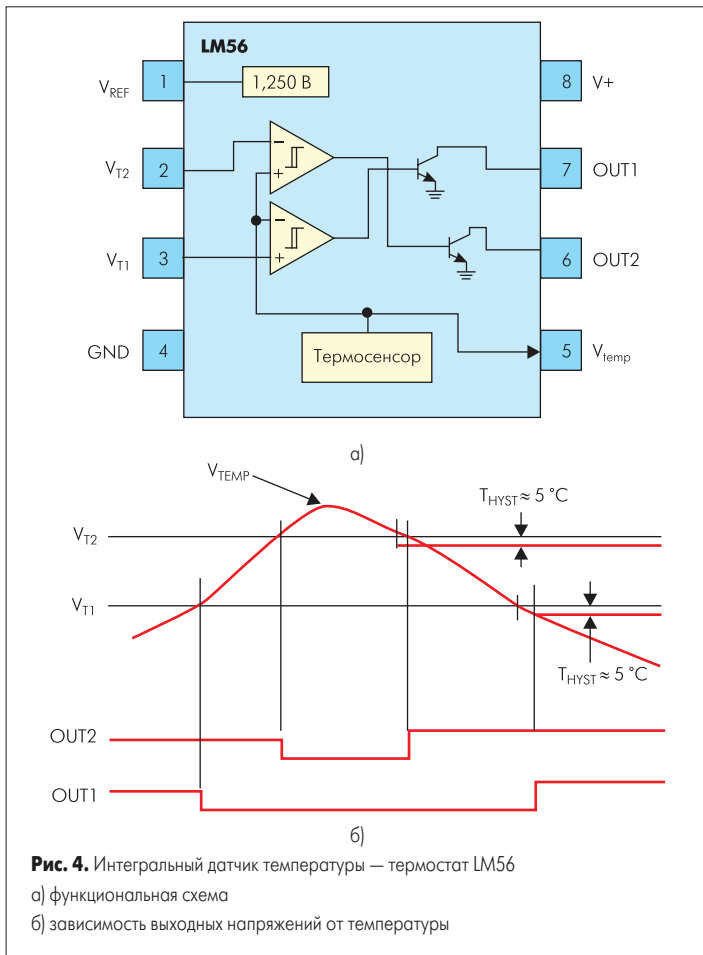
ИДТ LM60 и LM62 работают при напряжении питания от 2,7 В. Благодаря малому потреблению тока погрешность измерения температуры из-за саморазогрева не превышает 0,2 °С в воздухе. LM60 выпускается в корпусах SOT-23 и TO-92, а LM60 — только SOT-23.

Микромощные миниатюрные термодатчики LM20 изготавливаются по технологии КМОП, и хотя температурная зависимость выходного напряжения для этих приборов имеет небольшую параболическую составляющую, максимальная погрешность измерений во всем диапазоне измеряемых температур от -55 до +130 °С для ИДТ модификации LM20B не превышает ±2,5 °С, а для LM20C — ±5 °С. В отличие от рассмотренных выше датчиков, выполненных по биполярной технологии, у LM20 температурный коэффициент отрицательный. В диапазоне температур от -40 до +85 °С выходное напряжение U описывается линейной функцией температуры и имеет вид

$$U = -11,67 \text{ мВ/}^\circ\text{C} \times T + 1,8583 \text{ В}$$

с погрешностью не более ±0,65 °С. Для расчетов во всем температурном диапазоне для со-





хранения минимальной погрешности в коэффициенты следует вносить поправки.

Благодаря сверхмалому потреблению тока (максимально 10 мкА), LM20 прекрасно подходят для использования в устройствах с батарейным питанием, отметим также, что саморазогрев термодатчика в воздухе не превышает 0,02 °С. Выпускаются в корпусах SC-70-5 и micro SMD.

Интегральный датчик температуры LM56 предназначен для использования в термостатах. Функциональная схема ИДТ LM56 и графики, поясняющие особенности его функционирования, представлены на рис. 4.

Используя внешние резисторы и внутренний источник опорного напряжения 1,250 В, на контактах 3 и 2 задают пороговые напряжения переключения компараторов VT1 и VT2, соответствующие заданным температурам T1 и T2. В результате на выходе 1 (OUT1 — контакт 7) формируется напряжение низкого уровня, если температура превысит значение T1, и, соответственно, напряжение высокого уровня, если температура упадет ниже значения T1 — Thyst (Thyst ≈ 5 °С). Аналогично по отношению к температуре T2 формируется сигнал на выходе 2 (OUT2 — контакт 8). Напряжение на выходе микросхемы VTEMP (контакт 5) пропорционально температуре в градусах Цельсия с коэффициентом 6,2 мВ/°С и смещено на +395 мВ, погрешность измерения температуры во всем диапазоне не превышает 3 °С для модификации LM56BIM и 4 °С для LM56CIM. Типовая схема включения ИДТ LM56 и формулы для расчета сопротивления резисторов R1 — R3, задающих величины пороговых температур,

приведены на рис. 5. Отметим, что максимальный ток коллекторов выходных транзисторов составляет всего 50 мкА, что требует подключения к ним достаточно высокоомной нагрузки. LM56 выпускаются в обычных и мини-корпусах SO-8.

Перейдем теперь к рассмотрению интегральных датчиков температуры с цифровым выходом. ИДТ LM70 и LM74 представляют семейство цифровых термодатчиков с последовательным интерфейсом, совместимым с протоколами Motorola SPI и National Semiconductor MICROWARE. Функциональная схема LM70 приведена на рис. 6, LM74 отличается от него 13-битным АЦП. LM70/74 функционируют как ведомые устройства, полный цикл приема-передачи данных занимает 32 такта сигнала SC, из которых первые 16 отводятся передаче данных на контроллер, а вторые — приему. Управление работой датчика производится путем записи данных в конфигурационный регистр, для идентификации ИДТ и считывания результатов измерений служат регистр идентификации и температурный регистр, работающие в режиме чтения.

LM70/74 аппаратно совместимы практически с любыми микроконтроллерами, программирование которых в этом случае не составляет большого труда. Для экономии энергии в интервале между измерениями имеется возможность перевода ИДТ в режим shutdown с током потребления менее 10 мкА, что может быть очень полезно в устройствах с автономным питанием. Существует два варианта микросхем по напряжению питания: LM70/74-3 — 2,65–3,6 В, LM70/74-5 — 4,5–5,5 В. LM70 выпускаются в корпусах с 8 выводами MSOP и LLP, а LM74 — SO-8 и 5-выводном microSMD.

Цифровые ИДТ LM75–LM77 имеют последовательный двухпроводной интерфейс по протоколу Philips I2C, а также дополнительные цифровые выходы, изменяющие свое состояние, когда температура превышает заданное значение (OverTemper) или выходит из заданных пределов (OverWin). Последние выполнены с открытым стоком и могут использоваться для построения термостатов, сигнализаторов превышения температуры, а также для работы микроконтроллера по прерыванию. Функциональная схема LM76 приведена на рис. 7. ИДТ функционируют как ведомые устройства, имеется развитая система внутренних регистров для установки режимов работы и параметров выходных сигналов. Для облегчения программирования термодатчиков на сайте фирмы свободно предлагается соответствующее программное обеспечение. В интервале между измерениями имеется возможность перевода ИДТ в режим shutdown с током потребления не более 8 мкА. LM75/6/7 выпускаются в 3- и 5-вольтовой модификации в корпусах с 8 выводами SO и MSOP.

Последнее поколение цифровых ИДТ, разработанных фирмой National Semiconductor, как уже отмечалось выше, кроме измерения локальной (собственной) температуры позволяет подключать удаленные термодатчики, в качестве которых может использоваться диод или транзистор в диодном включении, например 2N3904, а также сенсор, встроенный в микропроцессор. Семейство LM82/83/84/86/88/90/91 (в таблице не показаны) цифровых ИДТ такого типа с последовательным двухпроводным интерфейсом SMBus позволяют под-

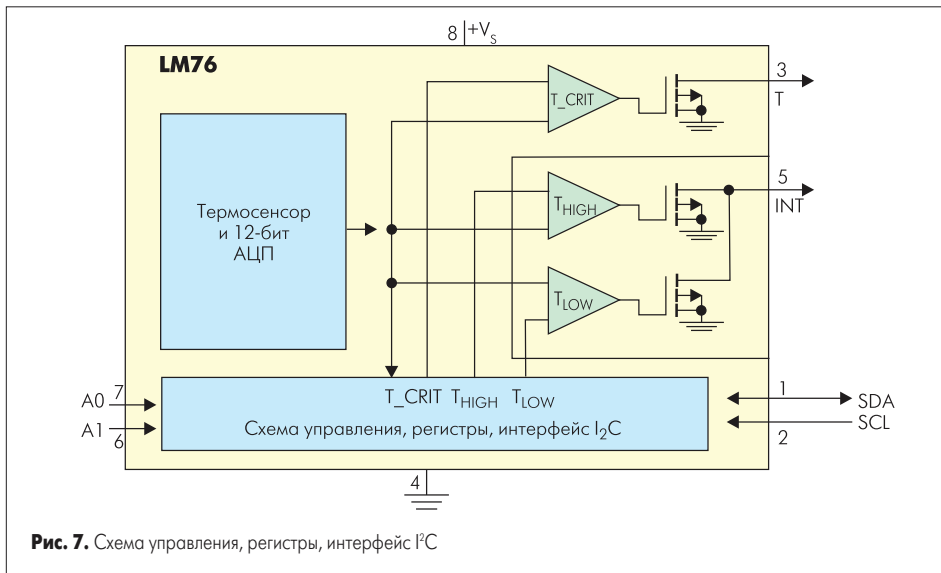


Рис. 7. Схема управления, регистры, интерфейс I²C

ключать от одного до трех удаленных датчиков и обеспечивают точность измерения температуры от 1 до 3 °C в диапазоне от 0 до +125 °C. Выпускаются в 8-выводных корпусах SO и MSOP (LM86 и LM90) и 16-выводном QSOP.

Для корректной работы аппаратных средств современных компьютеров необходим постоянный мониторинг напряжений питания и температуры микропроцессора, и, если эти параметры выходят за предел допустимых значений, функционирование системы следует прекратить. Для контроля температуры многие современные микропроцессоры, в частности Pentium и др., снабжены расположенным непосредственно на кристалле специальным p-p-р-транзистором, коллектор которого соединен с подложкой, а база и эмиттер выведены на

основной разъем процессора. Измерение температуры и напряжений питания, а также управление вентилятором охлаждения, выдачу в случае необходимости аварийных сигналов и блокировку работы системы производят специализированные контроллеры — системные мониторы (System Hardware Monitors).

Фирма National Semiconductor выпускает семейство системных мониторов LM80/81/85/87 с последовательным двухпроводным интерфейсом SMBus в 24-выводных корпусах TSSOP. В частности, системный монитор LM85 контролирует четыре основных напряжения питания процессора (2,5, 3,3, 5,0 и 12 В), имеет встроенный термодатчик и позволяет подключать два удаленных, сигналы с которых оцифровываются 8-разрядным АЦП, что поз-

воляет измерять температуру в диапазоне от 0 до +125 °C с разрешением 1 °C. В состав монитора входит также система контроля данных от четырех тахометрических датчиков вентиляторов и три формирователя ШИМ-напряжений для управления их работой. Пять цифровых входов VID — сигналов идентификации от процессора — позволяют устанавливать определенные режимы работы монитора для различных ситуаций. Другие системные мониторы семейства имеют ряд дополнительных аналоговых и цифровых входов и выходов — сигналов прерывания, аварийного сброса процессора, вскрытия шасси и др.

В заключение следует отметить, что ИДТ с цифровым интерфейсом, используемые для контроля температуры микропроцессоров и других микросхем, обычно устанавливают прямо на материнских платах. Однако, как показывают эксперименты, теплопередача к термосенсору осуществляется в основном не через корпус микросхемы датчика, а через его выводы, поэтому фактически измеряется приповерхностная температура участка материнской платы и печатных проводников, и таким образом может возникнуть систематическая ошибка измерения температуры, которую следует определить и учитывать в каждом конкретном случае.

Литература

1. Linear/Mixed-Signal Designer's Guide Summer 2002. National Semiconductor. 2002.
2. Kester W., Briant J., Jung W.. Practical Design Techniques For Sensor Signal Conditioning. Chap. 7. Перевод в журнале «Схемотехника». 2000. № 3.