

Датчики температуры

Различного рода датчики в современной электронике играют исключительно важную роль. Любой разработчик в своей практической деятельности рано или поздно сталкивается с необходимостью использования этих устройств. Хорошей справочной литературы по датчикам в нашей стране практически нет, тогда как специалисты американской компании Analog Devices подготовили прекрасный учебник «Practical techniques for sensor signal conditioning», адресованный инженерам, использующим датчики в своих разработках. Мы приняли решение постепенно переводить и публиковать на страницах нашего журнала некоторые главы из этой книги. Первый цикл публикаций использует материалы седьмой главы и посвящен датчикам температуры.

Спектр использования температурных датчиков чрезвычайно широк: от зарядных устройств до дорогостоящих портативных приборов. Везде, где характеристики системы так или иначе зависят от температурных факторов, применяются эти приборы.

Все термодатчики, за исключением собранных на ИС, имеют нелинейную зависимость выходного сигнала от температуры. В прошлом для корректировки этой нелинейности был разработан широкий спектр ана-

RTDs) точны, но требуют, чтобы через них был пропущен электрический ток (excitation current, возбуждающий ток), и используются обычно в мостовых схемах. Термисторы наиболее чувствительны, но при этом имеют высокую нелинейность. Они наиболее популярны в портативных приборах и используются при измерении температуры батарей, а также других критических, в отношении температуры, узлов в системах.

Современные полупроводниковые датчики температуры характеризуют-

Принцип работы термопары и компенсация напряжения на холодном спае

Термопары — маленькие, прочные и сравнительно недорогие устройства. Вдобавок из всех температурных датчиков они работают в самом широком диапазоне температур. Термопары незаменимы при измерении высоких температур (вплоть до 2300 °С) в агрессивных средах. Они вырабатывают на выходе термоЭДС в диапазоне от микровольт до милливольт, однако требуют стабильного усиления для последующей обработки. К тому же необходимо применять компенсацию напряжения на холодном спае, которая вкратце будет обсуждена ниже. Они гораздо более линейны, чем многие другие датчики, а их нелинейность на сегодняшний день хорошо изучена и описана в специальной литературе.

В табл. 2 приведены наиболее распространенные термопары. При их изготовлении обычно применяют такие металлы, как железо, платина, родий, рений, вольфрам, медь, алюмель (сплав никеля с алюминием), хромель (сплав никеля с хромом) и константан (сплав меди и никеля).

На рис. 1 представлены зависимости ЭДС от температуры трех наиболее распространенных типов термопар, у которых температура опорного спае поддерживается равной 0 °С. Термопары типа J наиболее чувствительны и развивают наибольшее выходное напряжение при одном и том же изменении температуры. С другой стороны, термопары типа S являются наименее чувствительными. Как видно из приведенных характеристик, сигналы, развиваемые термопарами, очень малы и требуют малошумящих усилителей с большим коэффициентом усиления и малым дрейфом. Это необходимо учитывать при проектировании схем обработки сигналов с термопарных датчиков.

Чтобы понять поведение термопар, рассмотрим, как изменяется их выходной сигнал при изменении температуры чувствительной части термопары (горячего спае). Рисунок 1 показывает связь между температурой горячего спае и выходным сигналом, развиваемым разными типами термопар (во всех случаях температура холодного спае поддерживается равной 0 °С). Очевидно, что отдача термопар нелинейна, но природа этой нелинейности до сих пор не вполне ясна.

Рисунок 2 показывает, как зависит от температуры горячего спае коэффициент линейности (Seebeck coefficient), то есть прирост выходного напряжения, соответствующий росту температуры горячего спае на 1 °С, иными словами, первая производная зависимости выходного сигнала от температуры. Отметим, что мы по-прежнему рассматриваем тот случай, когда температура холодного спае поддерживается равной 0 °С.

При выборе термопары для производства замеров температур в достаточно широком диапазоне следует выбирать ту термопару, коэффициент линейности которой изменяется менее других в рамках этого диапазона.

Таблица 1

Термопара	RTD	Термистор	Полупроводниковый датчик
Широчайший диапазон: 184 °С...+ 2300 °С	Диапазон: -200°С...+ 850°С	Диапазон: 0°С...+100°С	Диапазон: -55°С...+150 °С
Высокая точность и воспроизводимость	Превосходная линейность	Сильная нелинейность	Линейность: 1 °С Точность: 1 °С
Требует компенсации напряжения на холодном (опорном) спае	Требует токового возбуждения	Требует токового возбуждения	Требует токового возбуждения
Низковольтный выход	Низкая цена	Высокая чувствительность	Типовой выходной сигнал — 10 мВ/°С, 20 мВ/°С или 1 мкВ/°С

логовых схемотехнических решений. Эти схемы зачастую требовали индивидуальной калибровки. Чтобы достичь заданной точности, в них использовались прецизионные резисторы. Сегодня, благодаря наличию АЦП с высокой разрешающей способностью, сигналы с датчиков могут быть оцифрованы непосредственно, без предварительного усиления и линеаризации. Линеаризация, компенсация напряжения на опорном спае и другая обработка выполняются затем цифровыми способами, что позволяет снизить сложность и стоимость системы.

Термометры сопротивления (Resistance Temperature Devices,

ся высокой точностью и линейностью в диапазоне температур от -55 °С до +150 °С. Встроенные усилители позволяют подобрать усиление и смещение так, чтобы выходной сигнал имел заранее заданную температурную зависимость, например 10 мВ/°С. Они широко применяются в схемах компенсации напряжения на опорных спае широкодиапазонных термопар. Полупроводниковые датчики могут быть интегрированы в многофункциональные микросхемы, которые выполняют определенное количество аппаратных мониторинговых функций.

В табл. 1 перечислены наиболее распространенные температурные датчики и их основные особенности.

Например, для термопары типа J в диапазоне от 200 до 500 °C коэффициент линейности изменяется менее чем на 1 мкВ/°C, что делает ее иде-

выбранной термопары. Используя рис. 2, разработчик для работы в диапазоне 400...800 °C выберет термопару типа K, коэффициент линейности

если знаем температуру второго спая (часто называемого «опорным» или «холодным»).

Но не так легко измерить напряжение, образуемое термопарой. Предположим, что мы подключили вольтметр в контур схемы (рис. 3, г). Провода,

Таблица 2

Хромель-алюмель	-184...1260	39	K
Платина (13%иридий-платина)	0...1553	11,7	R
Платина (10%иридий-платина)	0...1538	10,4	S
Медь-константан	-184...400	45	T

альной для использования в этом диапазоне.

Приведенные на рис. 1 и 2 данные полезны вдвойне: во-первых, рис. 1 показывает диапазон и чувствительность трех типов термопар, так что разработчик может с одного взгляда

которой в этой области минимальный, а для диапазона 900...1700 °C — типа S. Поведение коэффициента линейности термопары оказывается определяющим в тех случаях, когда некоторое отклонение от заданной температуры критичнее, чем само значение заданной температуры. Эти данные также показывают, какими характеристиками должны обладать устройства, работающие в схеме управления совместно с той или иной термопарой.

Чтобы успешно использовать термопары, необходимо понимать основные принципы их работы. Рассмотрим схемы, изображенные на рис. 3.

Если мы соединим два разнородных металла при какой-либо температуре, превышающей абсолютный ноль (-273,16 °C), то между ними будет разность потенциалов (так называемая, термоЭДС — Thermoelectric EMF, или «контактная разность потенциалов»), которая является функцией температуры соединения (рис. 3, а). Если мы соединим два провода в двух местах, сформируются два спая (рис. 3, б). Если эти спаи имеют разную температуру, то в цепи образуется термоЭДС, по проводникам потечет ток, величина которого определяется значением термоЭДС и сопротивлением проводников.

Разорвав один из проводников, мы увидим, что напряжение в точках разрыва будет равным термоЭДС, и если замерить это напряжение, то полученное значение можно использовать, чтобы определить разность температур между двумя спаями (рис. 3, в).

Необходимо помнить, что термопара изменяет разницу температур между двумя спаями, а не абсолютную температуру в одном из них. Определить температуру в измеряемом спае мы можем лишь в том случае,

подключенные к вольтметру, также образуют термопары в месте их присоединения. Если обе эти дополнительные термопары находятся под одинаковой температурой (не имеет значения, какой), то они не окажут воздействия на общую термоЭДС системы. Если же их температуры различаются, то могут возникнуть ошибки. Поскольку каждая пара находящихся в контакте разнородных металлов вырабатывает термоЭДС (включая медь/припой, ковар/медь (ковар — сплав, используемый для формирования подложки микросхемы), алюминий/ковар [в соединении внутри микросхемы]), очевидно, что в реальных рабочих контурах возникают гораздо более серьезные проблемы, чем описано выше. Поэтому необходимо постараться обеспечить, чтобы все контакты разнородных металлов в контуре вокруг термопары (естественно, помимо спаев самой термопары) находились при одинаковой температуре.

Термопары создают напряжение, хотя и очень маленькое, но не требующее токового возбуждения. Показанная на рис. 3, г термопара имеет два спая (T1 — температура измерительного спая, T2 — опорного). Если T2 = T1, тогда V2 = V1 и выходное напряжение V = 0. Выходное напряжение термопары обычно определено как значение, полученное при поддержании температуры холодного спая, равной 0 °C. Отсюда и происхождение термина «холодный спай» или «спай при температуре тающего льда». Таким образом, если измерительный спай будет помещен в среду с нулевой температурой, на выходе термопары будет нулевое напряжение.

Чтобы проводить высокоточные измерения, необходимо тщательно поддерживать температуру холодного спая, которая должна быть строго определена (хотя не обязательно равна 0 °C). Простая реализация этого требования представлена на рис. 4. Ванна с тающим льдом может быть легко реализована в любых условиях, хотя на практике это не всегда удобно.

Сегодня «спай при температуре тающего льда» с требуемой для его реализации ванной со льдом и водой успешно вытесняется электроникой. Температурный датчик другого типа (чаще полупроводниковый, а иногда и термистор) измеряет температуру холодного спая, а полученный результат используется для формирования дополнительного напряжения в цепи термопары, компенсирующего разницу между фактической температурой холодного соединения и его идеальным значением (обычно 0 °C), как показано на рис. 5. В идеале напряжение компенсации должно подбираться

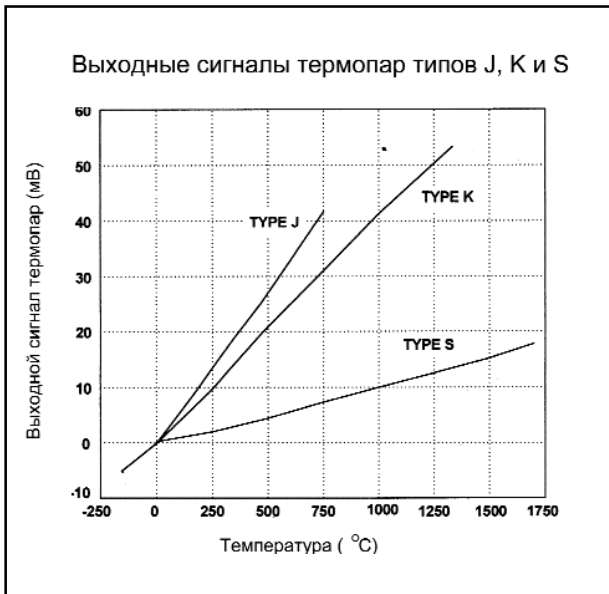


Рис. 1

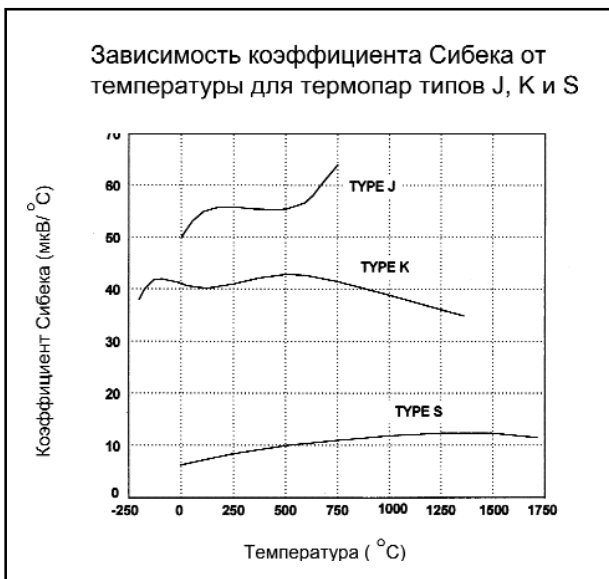


Рис. 2

определить, что термопара типа S имеет самый широкий диапазон измерений, но типа J — более чувствительная; во-вторых, знание коэффициента Сибека (рис. 2) позволяет быстро определить, какова линейность

строго в зависимости от разности напряжений. Корректирующее напряжение является функцией от температуры опорного спая T2, причем более сложной, нежели простая линейная зависимость, описываемая произведением

Когда используется электронная компенсация напряжения на холодном спае, на практике соединение проводов с концами термопары заключают в изотермический блок, как показано на рис. 6. Когда соединены металл А — медь и металл В — медь находятся при одной температуре, это эквивалентно спаю металл А — металл В, как показано на рис. 5.

Схема, приведенная на рис. 7, обеспечивает измерение температуры от 0 °С до 250 °С при помощи термопары типа К с компенсацией напряжения холодного спая. Питание схемы осуществляется однополярным напряжением от 3,3 до 12 В. Причем схема была спроектирована таким образом, чтобы коэффициент преобразования составлял 10 мВ/°С.

Коэффициент передачи термопары типа К приблизительно равен 41 мкВ/°С. Следовательно, примененный для компенсации датчик напряжения с температурным коэффициентом 10 мВ/°С TMP35 используется с делителем на R1 и R2, обеспечивающим требуемое значение 41 мкВ/°С. Ликвидация неизотермичности между дорожками печатной платы и проводами термопары предотвращает появление ошибок в процессе измерения при изменении температуры. Такая компенсация подходит для схем, работающих при температуре окружающей среды от 20 до 50 °С.

Если температура рабочего спая термопары достигла 250 °С, ее выходное напряжение будет составлять 10,151 мВ. Поскольку при этом выходной сигнал схемы должен быть равен 2,5 В, то усилитель должен иметь коэффициент усиления, равный 246,3. Выбор R4, равного 4,99 кОм, предопределяет для R5 значение 1,22 МОм. На более близкое однопроцентное значение для R5 составляет 1,21 МОм, в связи с чем для точной настройки размаха выходного сигнала совместно с R5 используется потенциометр сопротивлением 50 кОм.

Хотя ОР193 допускает питание от одного источника, его выходные каскады не предназначены для работы в режиме rail-to-rail и минимальное значение сигнала на его выходе не должно быть ниже +0,1 В. С этой целью резистор R3 добавляет ко входу ОУ небольшое напряжение, увеличивающее выходной сигнал на 0,1 В для питающего напряжения 5 В. Это смещение (соответствующее 10 °С) должно быть вычтено после обработки или считывания сигнала с выхода ОР193. R3 также обеспечивает определение обрыва термопары: если термопара отсутствует, выходной сигнал становится больше чем 3 В. Резистор R7 балансирует входное сопротивление ОР193 по постоянному току, а пленочный конденсатор емкостью 0,1 мкФ снижает помехи от термопары на его неинвертирующем входе.

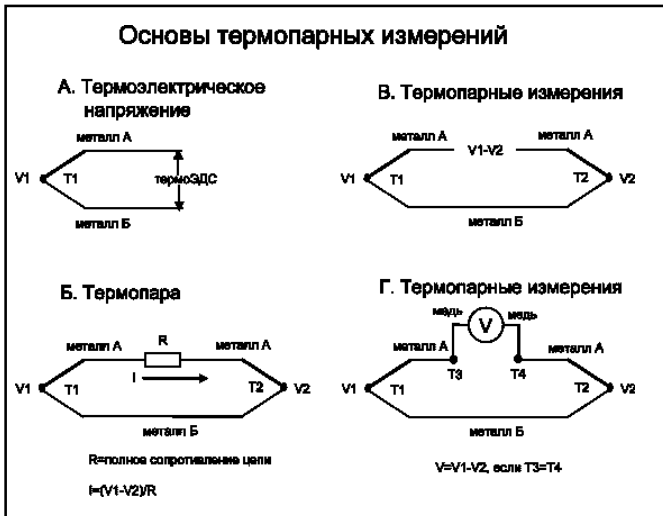


Рис. 3

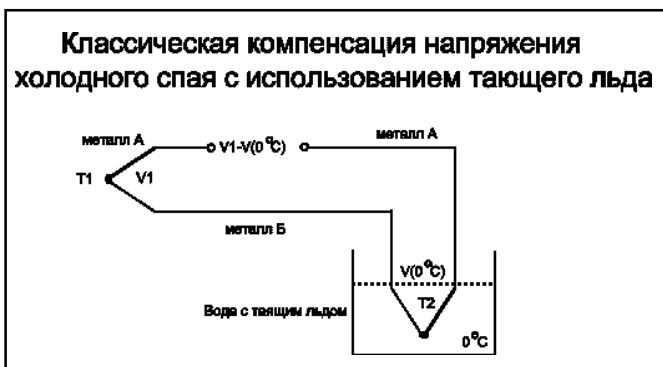


Рис. 4



Рис. 5

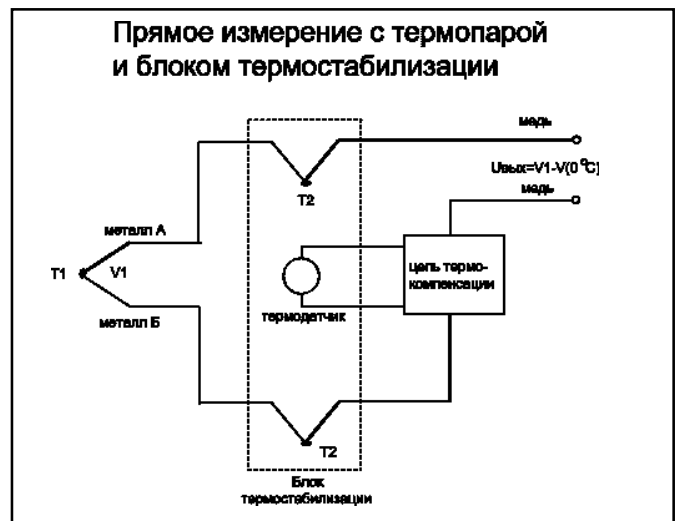


Рис. 6

KxT^2 , где K — простая константа. На практике, поскольку холодные спаи обычно находятся при температуре лишь на несколько десятков градусов выше 0 °С и ее значение колеблется в пределах ± 10 °С, линейная аппроксимация компенсирующего напряжения оказывается допустимой. Другими словами, хотя реальное значение корректирующего напряжения и определяется многочленом в соответствии с формулой $V = K_1xT + K_2xT^2 + K_3xT^3 + \dots$, но значения коэффициентов K_2, K_3 и т. д. очень малы для всех известных типов термопар. Значения этих коэффициентов для всех термопар можно найти в справочной литературе.

AD594/AD595 — инструментальный усилитель и компенсатор напряжения холодного спая, выполненный в одном чипе (рис. 9). Эта микросхема осуществляет привязку к «точке таяния льда» и содержит предварительно откалиброванный усилитель, который обеспечивает получение выходного напряжения высокого уровня (10 мВ/°С) непосредственно с выхода термопары. AD594/AD595 может быть использована как линейный усилитель-компенсатор либо в качестве переключаемого контроллера, используемого для постоянного или мобильного управления и регулирования. Схема может быть также использована для прямого усиления компенсируемого

напряжения, выполняя при этом функции преобразователя температуры в напряжение с коэффициентом преобразова-

ния $10 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$. В ряде случаев очень важно, чтобы чип находился при той же температуре, что и холодный спай термопары. Обычно это достигается путем размещения обоих в непосредственной близости друг от друга и изоляции их от источников тепла.

AD594/AD595 включает датчик повреждения термопары, который показывает, что либо один, либо оба конца термопары отсоединены от микросхемы. Аварийный выход достаточно гибкий и в состоянии формировать TTL-сигнал. Прибор запитывается от одного положительного источника (напряжение на нем может быть всего 5 В), но подача отрицательного напряжения позволяет измерить температуру ниже 0°C . Для уменьшения самонагрева собственное потребление AD594/AD595 (без нагрузки) снижено до 160 мкА , при этом микросхемы в состоянии отдать в нагрузку ток до $\pm 5 \text{ мА}$.

Благодаря лазерной подгонке сопротивлений внутри AD594 схема настроена на работу с термопарами типа J (железо/константан), а AD595 — с термопарами типа K (хромель/алюмель). Напряжения смещения и коэффициенты усиления микросхем могут изменяться при помощи внешних элементов, так что каждая из них может быть перекалибрована под термопару любого другого типа. Допустимо также с помощью внешних элементов осуществить более точную калибровку термопары для специальных применений.

AD594/AD595 выпускаются в двух модификациях: «С» и «А», — калибрующихся с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$ и $\pm 3^\circ\text{C}$ соответственно. Оба исполнения допускают поддержание температуры холодного спая в пределах от 0°C до 50°C . Схема, представленная на рис.9, непосредственно работает с термопарой типа J (AD594) или типа K (AD595) и позволяет измерять температуру от 0°C до 300°C .

AD596/AD597 — монолитные контроллеры, оптимизированные для использования в условиях любых температур в различных случаях. В них осуществляется компенсация напряжения холодного спая и усиление сигналов с J- или K-термопары таким образом, чтобы получить сигнал, пропорциональный температуре. Схемы могут быть подстроены так, чтобы обеспечить выходное напряжение $10 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$ непосредственно от термопар типа J или K. Каждый из чипов размещен в металлическом корпусе с десятью выводами и настроен на работу при температуре окружающей среды от 25°C до 100°C .

AD596 усиливает сигналы термопары, работающей в температурном диапазоне от -200°C до $+760^\circ\text{C}$, рекомендованном для термопар типа J, в то время как AD597 работает в диапазоне от -200°C до $+1250^\circ\text{C}$ (диапазон термопар типа K). Усилители откалиброваны с точностью $\pm 4^\circ\text{C}$ при температуре окружающей среды 60°C и характеризуются температурной стабильностью $0,05^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$ при изменении температуры окружающей среды в пределах от 25°C до 100°C .

Все вышеописанные усилители не в состоянии компенсировать нелинейность термопары: они способны лишь корректировать и усиливать сигнал с термопарного выхода. АЦП с высокой разрешающей способностью, входящие в семейство AD77xx, могут использоваться для прямой оцифровки сигнала с выхода термопары, без предварительного усиления. Преобразование и линеаризацию осуществляет микроконтроллер, сопряженный с таким АЦП, как показано на рис.10. Два мультиплексируемых входа АЦП используются для прямой оцифровки сигнала с термопары и с теплового датчика, находящегося в контакте с ее холодным спаем. Вход PGA (программируемого усилителя) программируется на усиление от 1 до 128, и разрешающая способность АЦП лежит в пределах от 16 до 22 бит в зависимости от того, какая из микросхем выбрана пользователем. Микроконтроллер осуществляет как компенсацию напряжения холодного спая, так и линеаризацию характеристики.

Использование термодатчика TMP35 для компенсации напряжения холодного спая

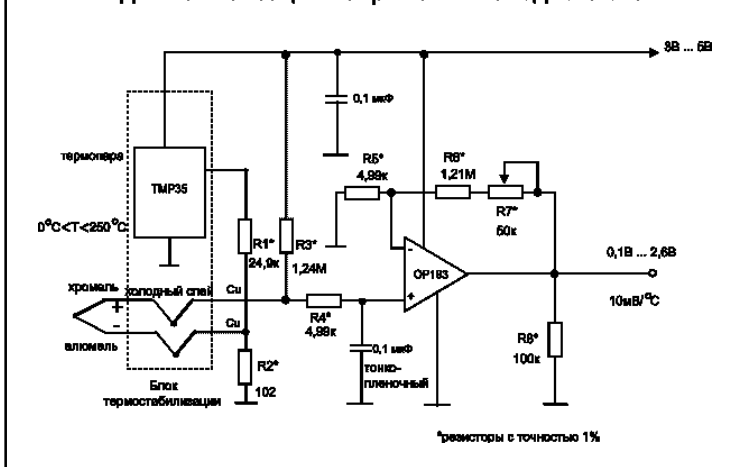


Рис. 7

AD594/AD595 термопарный усилитель с компенсацией напряжения холодного спая

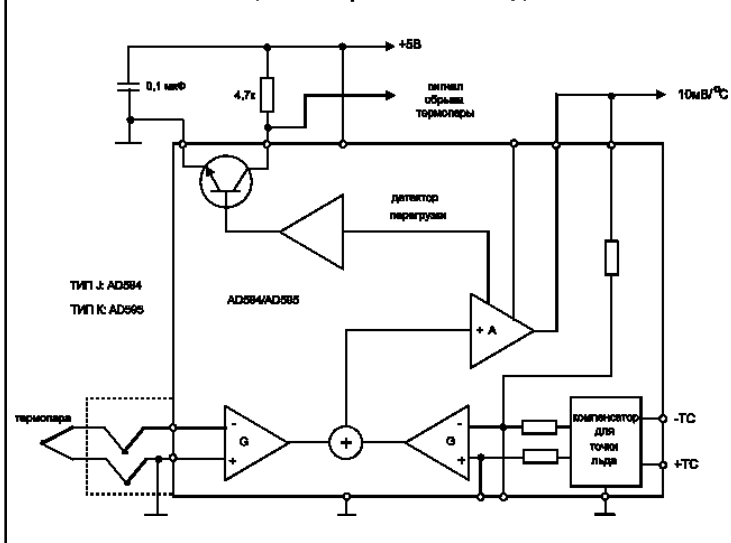


Рис. 8

АЦП AD77XX с TMP35 для компенсации напряжения холодного спая

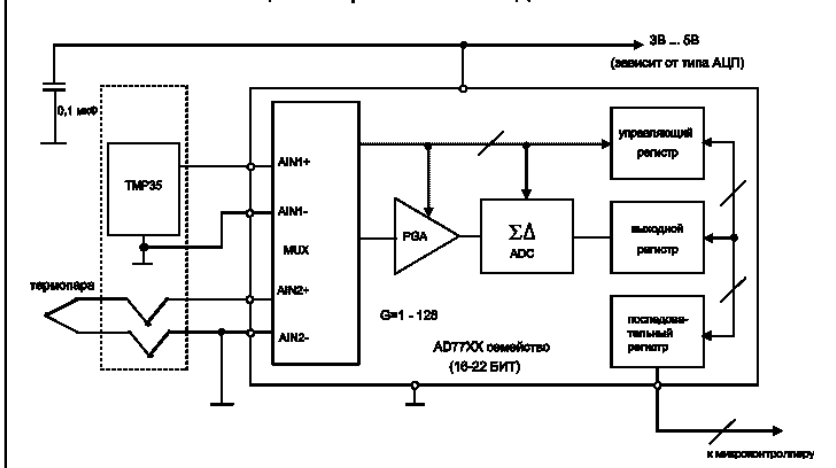


Рис. 9

Wall Kestler, James Bryant, Wall Jung
Перевод и обработка
Андрея Асташкевича, Александра Фрунзе,
Москва