

Министерство образования и науки Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.А. ЖМУДЬ

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ

Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2012

УДК. 681.518.3(075.8)
Ж 774

Рецензент
д-р техн. наук, проф. *Г.А. Французова*

Жмудь В.А.

Ж 774 Измерительные элементы автоматики : учеб. пособие
В.А. Жмудь. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2012. – 72 с.

ISBN 978-5-7782-2125-3

Пособие является обзором основных проблем поиска и выбора измерительных элементов при разработке и создании прецизионных систем управления для метрологических целей и для фундаментальных физических исследований.

Предназначено студентам факультета кафедры автоматики в качестве дополнительного материала по курсу «Микропроцессорные устройства и системы» по специальности 220201 «Управление и информатика в технических системах».

Работа выполнена в рамках задания Министерства образования и науки РФ (проект №7.599.2011)

УДК. 681.518.3(075.8)

ISBN 978-5-7782-2125-3

© Жмудь В.А., 2012
© Новосибирский государственный
технический университет, 2012

ВВЕДЕНИЕ

Микропроцессорные устройства автоматики, как и всякие управляющие системы, используют сигналы, несущие информацию о состоянии управляемых объектов для формирования воздействия на объект, изменяющего его состояние в требуемом направлении на нужную величину. Поэтому в любой автоматической системе необходимы датчики – устройства, преобразующие измеряемые величины, в электрический сигнал. Обобщенная функциональная схема микропроцессорной управляющей системы показана на рис. В.1.

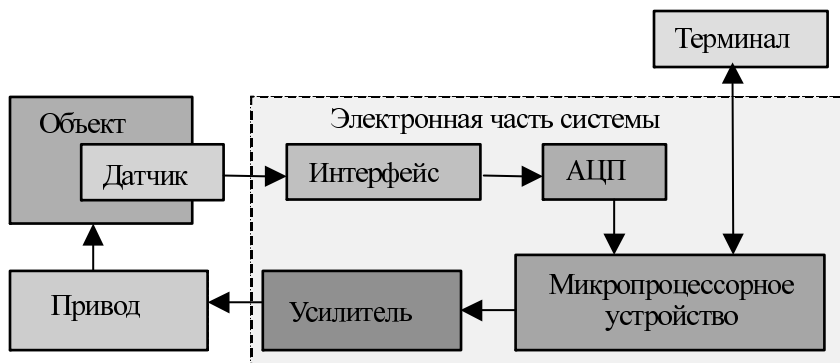


Рис. В.1. Обобщенная функциональная схема микропроцессорной управляющей системы

Датчик преобразует измеряемую величину в электрический сигнал, который через интерфейс и АЦП поступает в микропроцессорное устройство. Туда же от пользователя поступает предписанное значение управляемой величины (если оно не задано однократно при проектировании). Микропроцессорное устройство, анализируя разницу между измеренной величиной и ее предписанным значением, формирует управляющий сигнал обратной связи, который через усилитель поступает на привод, воздействующий на объект. В связи с развитием тех-

ники несколько элементов электронная части системы, или даже все они могут быть реализована на одном кристалле. Привод, как правило, осуществляет преобразование, обратное по отношению к датчику, то есть преобразует электрический сигнал в неэлектрическую величину (нагрев, охлаждение, перемещение, поворот и иное воздействие на объект).

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ДАТЧИКАХ

1.1. Классификация датчиков

Раздел 1 написан по материалам книги [1] Дж. Фрайдена (и местами в дискуссии с автором). Автор приводит такое определение датчиков: «Датчик – это устройство, воспринимающее сигналы и внешние воздействия и реагирующее на них» [1]. Автор не вполне прав, это определение излишне широко. Оно охватывает и органы чувств человека (глаза, уши) и органы управления технических систем (манипулятор «мышь», клавиатуру, спусковой крючок револьвера) и так далее.

Чтобы дать более корректное определение, будем понимать термин «устройство» как искусственно созданное изделие техники, а термин «реагирующее» понимать как «формирующее сигнал, который может быть воспринят техническим устройством», как правило, это – электрический сигнал. Следует также исключить из понятия «датчик» кнопки, переключатели, клавиатуру и прочие командные устройства для ввода дискретных сигналов и команд управления, хотя изредка и кнопки могут быть датчиками, например «концевой датчик» – устройство, формирующее сигнал достижения движущимся объектом крайней допустимой точки перемещения.

Тот же автор приводит уточненное определение датчика: «Датчик – это устройство, воспринимающее внешние воздействия и реагирующее на них изменением электрических сигналов» [1]. Оно слишком узко: выходом датчика может быть не только электрический сигнал, а также, например, изменение его электрического параметра (сопротивления, емкости и т. д.). Но и в этот термин опять входят органы управления, даже выключатели и кнопки.

Понятие «датчики» предполагает высокую оперативность получения измерительного сигнала, поскольку они чаще всего предназначены для контроля параметров процессов в темпе их протекания, а зачастую – и для управления этими параметрами. В этом смысле датчики отличаются от измерительных устройств, которые требуют большого времени на обработку сигнала для получения информации. Измери-

тельные устройства зачастую изготавливаются на основе датчиков, но в этом правиле имеются исключения.

В автоматике датчики применяются для оперативного измерения регулируемой величины с целью управления этой величиной в контуре с отрицательной обратной связью.

Иногда измерительные приборы используют несколько типов датчиков для измерения разных величин. Также могут быть использовано несколько типов датчиков, последовательно преобразующих измеряемую величину в электрический сигнал. Например, угол поворота может быть преобразован в перемещение оптического пучка, а далее порождаемые этим перемещением изменения освещенности фотодиодной линейки могут быть преобразованы в числовой код, по которому можно судить об угле поворота.

Датчики можно разделить на различные группы по выбранному признаку. По количеству измеряемых величин датчики разделяются на одноканальные и многоканальные.

По виду изменяемой величины можно выделить датчики со следующими видами преобразования измеряемой величины:

1. в изменения непосредственно самой электрической величины:
 - 1.1. тока;
 - 1.2. напряжения;
 - 1.3. заряда;
2. в изменения заданного свойства электрического сигнала:
 - 2.1. частоты периодического электрического сигнала;
 - 2.2. фазы периодического электрического сигнала;
 - 2.3. других свойств;
3. в изменения электрического параметра участка цепи:
 - 3.1. сопротивления;
 - 3.2. емкости;
 - 3.3. индуктивности;
 - 3.4. частоты резонанса в схеме замещения;
 - 3.5. других параметров;
4. в цифровой код:
 - 4.1. в параллельный код;
 - 4.2. в последовательный код;
 - 4.3. в специальный код.
5. в другое.

Термин «другое» включает все иные датчики, которые не подпадают ни под один подраздел данной классификации. Включение раз-

дела «другие» не обязательно, но в связи с развитием измерительных средств нельзя исключать появления датчиков, не вписывающихся в пп. 1–4.

Датчики можно разделить по схеме включения на следующие типы:

1. Тип **I**. Требующие внешнего возбуждения:

1.1. требующие непосредственно электрического возбуждения, не содержащие специальной схемы преобразования, питающиеся:

1.1.1. (стабильным) напряжением;

1.2.1. (стабильным) током;

1.3.1. включением в специальную (мостовую или иную) схему;

1.2. требующие другого способа возбуждения (в том числе, формируемого посредством электрического преобразователя);

1.3. требующие подключения источника электрического питания только (или в том числе и) для вторичных преобразователей, а также содержащие схему преобразования электрической или неэлектрической величины в стандартный сигнал, питающиеся;

1.3.1. одним напряжением;

1.3.2. несколькими напряжениями;

1.3.3. другие.

2. Тип **II**. Не требующие подключения внешнего возбуждения, формирующие:

2.1. ток;

2.2. напряжение или ЭДС;

2.3. другое (но не заряд).

Устройства, формирующие заряд, следует отнести к п.1.3., т. к. они не могут применяться без схемы преобразования заряда в напряжение или ток.

1.2. Датчик, как преобразователь энергии

Всякий датчик преобразует энергию и трансформирует её в электрический сигнал, или в иную форму изменения энергии, удобную для измерения. Для повышения точности измерения требуется увеличение сигнала на фоне возникающих шумов. Но, с другой стороны, чем сильнее получаемый сигнал (при прочих равных условиях), тем больше энергии забирается из среды, в которой осуществляется измерение.

Датчик, вносящий слишком большие изменения энергии (нагревающийся за счет выделяемой омической мощности, или отнимающий

тепло из измеряемой среды), не может служить для точных измерений. Но датчик, формирующий слишком слабый сигнал на фоне неотъемлемых шумов, также не оптимален. Поэтому, как правило, существует и должно достигаться оптимальное решение – как для выбора вида датчика, так и для рабочего режима этого датчика. Для этого применяются усилители сигналов, преобразующие слабые сигналы датчиков в сигналы достаточной мощности для их дальнейшей транспортировки и обработки. Схемы преобразования сигналов датчиков служат для этих целей, но не только. Они необходимы для преобразования одних электрических величин в другие, для снижения влияния нежелательных параметров, для стабилизации рабочего режима и для иных целей. Если схема преобразования встроена в датчик, применение датчика существенно упрощается, т. к. пользовательские характеристики обеспечиваются изготовителем, и почти не зависят от квалификации пользователя (и не требуют его слишком высокой изощренности при условии, что он следует рекомендациям разработчика).

Целесообразно отличать датчики от преобразователей вообще по следующему признаку: датчики предназначены исключительно для измерений, и поэтому преобразуют все виды энергии в электрический сигнал.

В противовес датчикам Дж. Фрайден вводит определение «приводы», то есть преобразователи, преобразующие электрическую энергию в механическую или иную форму энергии, необходимую для выполнения каких-либо функций или для восприятия человеком [1]. Примером таких преобразователей, могут служить акустический динамик, термоэлектрическая батарея и другие устройства, преобразующие электрический сигнал в иные формы воздействий и сигналов. К ним же по этой классификации относятся и мониторы, дисплеи, индикаторы.

Дж. Фрайден вводит иную классификацию датчиков, отличающуюся от той, которая приведена в предыдущем разделе. В частности, он выделяет «составные» датчики, а также датчики «прямого действия», построенные непосредственно на физических или химических явлениях, таких, как фотоэффект, и т. п. В состав любого датчика обязательно входит хотя бы один датчик прямого действия. В составной датчик входит еще хотя бы один преобразователь. Также различают датчики наружные и встроенные, бесконтактные и контактные. Суть классификации ясна из названия.

Параметрическими датчиками, а по классификации [1] – «активными», названы датчики типа **I**, требующие внешнего возбуждения, а

«пассивными» – датчики типа II, не требующие такового. В параметрических датчиках меняются их параметры (например, сопротивление), а для измерения изменения этих параметров приходится подавать электрический сигнал. В частности, сопротивление не может быть измерено непосредственно, а измеряется лишь падение напряжения на этом сопротивлении при протекании через него известного тока. Термисторы не формируют никаких сигналов, а лишь изменяют сопротивление в зависимости от температуры. Поэтому название параметрических датчиков «активными» не логично.

Датчики также подразделяются на абсолютные и относительные в зависимости от точки отсчета измеряемой величины. Абсолютный датчик формирует внешний сигнал пропорционально абсолютным физическим единицам, например, градусам Кельвина. Относительный датчик формирует сигнал пропорциональный разнице между измеряемой величиной и некоторой точкой отсчета. Таковы термопары, сигнал которых пропорционален разности температур горячего и холодного спаев.

Может использоваться также следующая классификация датчиков [1]:

По измеряемым характеристикам:

А) механические – давление, скорость, перемещение, ускорение и т. п.;

Б) электрические – ток, напряжение, сопротивление, заряд;

В) химические – кислотность и т. д.;

Г) физические – радиация и т. д.;

Д) другие.

По физическому принципу (по механизму преобразований):

А) физические – в основе которых лежит: термоэлектричество, фотоэлектричество, фотомagnetизм, магнитоэлектричество, электромагнетизм, термоупругость, электроупругость, термомагнетизм, термооптика, фотоупругость и т. д.

Б) химические – на основе химических преобразований, физико-химических преобразований, электрохимических процессов, спектроскопии и т. д.

В) биологические и т. д.

К характеристикам датчиков относятся:

А) статические (свойства преобразовательной характеристики) – чувствительность, точность (погрешность), гистерезис, нелинейность, мертвая зона и т. д.;

Б) динамические – быстродействие, выраженное во времени, необходимом для преобразования, или в нескольких характеристиках, та-

ких, как постоянная времени, время задержки, время восстановления после измерения и т. п.;

В) показатели применения – габариты, вес, климатические требования, температурный диапазон, формат выходного сигнала и т. п.;

Г) коммерческие – стоимость, надежность, долговечность и т. п.

Наряду с измеряемой величиной, на датчики действуют внешние воздействия, которые также могут приводить к изменениям параметров, служащих для измерений.

Среди **внешних воздействий на датчики** можно выделить следующие

1. Акустические (амплитуда, фаза или поляризация волны, спектр, скорость волны и др.).

2. Биологические (вид, концентрация, состояние биомассы, состояние микроорганизмов активное/неактивное, живое/неживое и др.).

3. Химические (концентрация, идентичность, состояние и др.).

4. Электрические (заряд; ток; потенциал; напряжение, амплитуда, фаза, поляризация или спектр поля, проводимость, диэлектрическая проницаемость и др.).

5. Магнитные (амплитуда, фаза, поляризация или спектр поля, магнитный поток, проницаемость и др.).

6. Оптические (амплитуда, фаза, поляризация, спектр или скорость волны; коэффициент отражения; излучающая, отражающая, поглощающая способность и др.).

7. Механические (положение – угловые или линейные координаты, ускорение, сила, напряжение, давление, деформация, масса, плотность, движение, момент, скорость потока, расход массы, форма, шероховатость, ориентация, жесткость, податливость и др.).

8. Вязкость (упорядоченность структуры, интеграция и др.).

9. Излучение (тип, энергия, интенсивность и др.).

10. Тепловые (температура, поток, тепло, теплопроводность и др.).

11. Радиоактивность (интенсивность излучения или накопительные)

В ряде случаев один и тот же тип датчика может использоваться для измерения различных физических величин, и в зависимости от схемы те же самые параметры могут изменять свою роль от измеряемых величин до внешних (мешающих) воздействий.

1.3. Приоритетная классификация датчиков с позиции пользователя

Приоритет выбора датчика чаще всего определен следующей классификацией.

Прежде всего, датчики подразделяются по самой физической величине, подлежащей измерению. Эта классификация основная. Если вас интересует температура, то вам не нужны сведения о датчиках давления или кислотности.

Далее классификация, которой невозможно пренебречь – по габаритам и по массе. Каким бы точным не был датчик, если он слишком велик, вы не сможете его использовать для измерений температуры мелкого предмета.

Следующая группа параметров, которыми невозможно пренебречь – погрешность датчика и быстродействие, а также диапазон измеряемых величин.

Если несколько различных датчиков устраивают разработчика измерительной системы по типу измеряемой физической величины, по габаритам, по точности, быстродействию и диапазону измеряемой величины, то разработчик может выбрать из них тот, который больше подходит по иным соображениям. Если же эти характеристики не отвечают требованиям, приходится жертвовать, например, точностью измерения и изыскивать способы снижения требований по этому виду, поскольку других вариантов просто не остается. Иногда вместо достижения требуемой точности измерения может оказаться достаточным достижение достаточно высокой повторяемости (воспроизводимости) измерительной характеристики, что нельзя считать хорошим решением, а можно лишь принимать как вынужденную меру.

При прочих равных условиях следует отдать предпочтение такому датчику, который наиболее удобно сочлется с последующей схемой обработки сигнала. При построении цифровых автоматических и автоматизированных систем управления на основе микропроцессорной техники, разумеется, предпочтительны датчики с цифровым выходом. Такие датчики формируют код, соответствующий измеренному значению интересующей величины.

Формат кода не имеет существенного значения, поскольку микропроцессорная система может преобразовать любой формат в требуемый. Но при прочих равных условиях, безусловно, предпочтителен такой формат, который удобен для выбранного типа микропроцессора.

Все же следует признать, что форма представления цифрового кода – это та характеристика, на которую менее всего следует обращать внимание при выборе датчика, то есть наименее приоритетный параметр.

Относительно цены датчиков можно на нынешней стадии развития электронной техники для большинства случаев отметить, что при создании уникальных научных, технических или промышленных систем автоматического управления цена датчика пренебрежимо мало сказывается на цене всей системы. Недостаточно высокое его качество по любому из важных параметров (точность, быстродействие, диапазон измерений) вносит определяющее влияние на свойства системы в целом. Поэтому экономия на датчиках (как и на всей электронной части системы) в большинстве случаев не оправдывает себя.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое датчик? Что общего между датчиком и приводом? В чем между ними разница (по определению и по назначению)?
2. По каким принципам классифицируются датчики, и на какие группы (типы) они подразделяются?
3. Какие параметры (в порядке их приоритетности) следует принимать во внимание при выборе датчиков?
4. Могут ли быть не принятыми во внимание при выборе датчика его габариты? Быстродействие? Вид измеряемой величины? Погрешность? Цвет? Цена? Производитель? Форма? Вес? Тип датчика (I или II)? Принцип действия?
5. Назовите три наиболее важных характеристики и три наименее важные на ваш взгляд характеристики датчика.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ

2.1. Передаточная функция

Для каждого датчика можно вывести идеальное (теоретическое) соотношение между входным и выходным сигналами. Нелинейные зависимости представляются в виде графика, таблицы, аналитической зависимостью или иным способом. В случае линейной зависимости, или зависимости, сводимой к линейной при малых отклонениях (путем разложения в ряд Тейлора вблизи рабочей точки) эта зависимость представляется простой аналитической зависимостью. Поскольку всякий реальный датчик имеет ограниченное быстродействие, и поскольку при расчете замкнутых систем это быстродействие должно учитываться, пренебрежение динамическими особенностями датчика недопустимо. Необходимы такие аналитические описания, которые включают динамические свойства, т. е. должен применяться аппарат дифференциальных уравнений или аппарат передаточных функций, который получается на основе дифференциальных уравнений в области операторных отображений по Лапласу:

$$u_{\text{ВХ}}(t) \overset{L}{\Leftrightarrow} U_{\text{ВХ}}(s). \quad (2.1)$$

Передаточная функция описывает отношение изображения приращения выходного сигнала к изображению приращения входного сигнала по Лапласу:

$$W(s) = U_{\text{ВЫХ}}(s) / U_{\text{ВХ}}(s). \quad (2.2)$$

Слово «приращение» в дальнейшем будем упускать, имея в виду, что значение измеряемого параметра вблизи рабочей точки всегда можно представить в отклонениях от этой точки, в этом случае измеряемый сигнал может иметь любую полярность, в зависимости от знака отклонения от этой точки. Именно это значение измеряемого сигнала $U_{\text{ВХ}}$ имеется в виду в соотношениях (2.1), (2.2).

Наиболее распространены передаточные функции линейных датчиков следующего вида:

$$W(s) = K / (1 + Ts), \quad (2.3)$$

где K – коэффициент передачи, T – постоянная времени.

Если инерционность датчика в десятки и более раз меньше, чем инерционность объекта, чей параметр измеряется, то лишь в этом случае можно пренебречь ей и положить $T = 0$.

В некоторых случаях полином в знаменателе соотношения (2.3) имеет более высокий порядок. В числителе этого соотношения может также стоять полином, но степень его всегда меньше степени полинома в знаменателе. Если датчик выдает информацию с запаздыванием τ , то передаточная функция содержит сомножитель вида $\exp(-\tau s)$:

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = u_{\text{ВХ}}(t - \tau) \xleftrightarrow{L} U_{\text{ВЫХ}}(s) = U_{\text{ВХ}}(s) \exp(-\tau s). \quad (2.4)$$

Иногда передаточной функцией называется характеристика, связывающая выходные величины датчика с его входными величинами, не учитывающая динамических свойств датчика [1]. **Такое название применять нежелательно**, чтобы избежать путаницы и ошибок.

2.2. Диапазон измеряемых значений

Возможности каждого датчика по измерению всегда ограничены динамическим диапазоном значений, которые он может измерить, то есть предельными границами входных сигналов. Он может быть описан отношением максимального измеряемого сигнала к минимальному, это отношение может быть представлено в логарифмическом виде.

Это удобно тем, что «логарифмическая шкала для малых сигналов работает как микроскоп. А в случае больших сигналов – как телескоп», то есть в рамках одного графика одинаково наглядно можно отобразить и сколь угодно большие и сколь угодно малые величины [1]. По определению один децибел равен десяти логарифмам отношения мощности двух сигналов, т. е.

$$1 \text{ дБ} = 10 \log \frac{P_2}{P_1}. \quad (2.5)$$

Исходя из этого, можно утверждать, что децибел превышает в двадцать раз логарифмы отношений сил тока, напряжений или сил, т. е.:

$$1 \text{ дБ} = 20 \log \frac{U_2}{U_1}. \quad (2.6)$$

Диапазон выходных значений полностью определяется диапазоном входных значений и чувствительностью датчика.

2.3. Точность датчиков

Точность – очень важная характеристика любого датчика, но этот термин – бытовой и не вполне корректен. Корректней определять обратную величину – **погрешность измерений**. Под погрешностью измерений понимают величину расхождения между показаниями реального и идеального датчиков. Различают максимальную, среднестатистическую и другие погрешности.

Погрешность датчика можно описать разностью между значением S , вычисленным по выходному сигналу датчика, и реальным значением поданного входного сигнала s .

Если датчик формирует выходной сигнал S , отличающийся от выходного сигнала идеального датчика S_0 на величину $\Delta S = S - S_0$, то вместо истинного значения измеряемой величины равно $s_0 = f^{-1}(S_0)$ будет определено измеренное значение $s = f^{-1}(S)$. Абсолютная погрешность в этом случае равна $\Delta s = s - s_0$, а относительная погрешность равна отношению этой погрешности к истинному значению измеряемой величины $\partial s = \Delta s / s_0 \approx \Delta s / s$. Она может быть измерена в процентах: $\partial s_{\%} = \partial s \times 100\%$.

Величины ΔS и ∂s – случайные. Математические ожидания этих величин именуются абсолютной и относительной систематической погрешностью, соответственно. Истинную погрешность никогда нельзя знать, но её среднее и максимальное значение можно оценить экспериментально или теоретически.

Предельно допустимые погрешности описывают худшие их значения. Если уточнить теоретическую зависимость результатами калибровки, уточненная калибровочная кривая (КК) проходит ближе к реальным преобразовательным характеристикам (ПХ), что повышает точность измерений. Целесообразно пределы допустимых погрешностей устанавливать не вокруг идеальной (теоретической) ПХ, а относительно КК. Допустимые пределы можно уменьшить, если исключить

погрешности, связанные с различиями датчиков от партии к партии, для чего необходимо уточнять КК для каждой партии. Если КК относится только к одному специально откалиброванному датчику, погрешность еще значительно уменьшится. Это, однако, повышает стоимость, из-за чего эти методы редко применяются.

Погрешность датчиков может быть представлена в следующих видах:

1. Непосредственно в единицах измеряемой величины (Δs);
2. В процентах от значения максимального входного сигнала ($\partial s_{\%}$), или от значения некоторой выбранной величины;
3. В единицах выходного сигнала (ΔS).

В современных датчиках погрешность часто характеризуется величиной **статистической ошибки измерений**, учитывающей влияние как систематических, так и случайных погрешностей, и не зависящих от ошибок, допущенных при определении ПХ.

Точность как характеристика, понимается, как величина, обратная погрешности. **Нежелательно описывать точность только указанием порядка погрешности** (или порядка точности), например, «точность составляет 10^6 ». Иногда можно услышать ошибочное утверждение, например: «точность составляет 10^{-6} ». Если относительная погрешность – это отношение абсолютной погрешности к измеренной величине (или к максимальному значению шкалы), то точность – это обратная величина, поэтому она должна выражаться значением много больше единицы. Поскольку правила статистического сложения погрешностей определены, а правил сложения точностей нет, **желательно пользоваться только термином «погрешность»**.

Единообразие терминологии исключает недопонимание. Так, например, если погрешность составляет $1 \cdot 10^{-10}$, что можно выразить фразой «имеется погрешность на уровне единицы десятого порядка», то точность будет равна обратной величине $1 \cdot 10^{10}$, что можно выразить фразой «точность составляет десятый порядок». Казалось бы, противоречия нет. Но если погрешность составляет, например $3 \cdot 10^{-10}$, и докладчик скажет: «имеется погрешность на уровне единиц десятого порядка», то точность для этого случая будет равна $0,3 \cdot 10^{10} = 3 \cdot 10^9$, т. е. в терминах точности докладчик может сказать «точность составляет единицы девятого порядка». Как видим, речь идет о разных порядках, хотя описывается один и тот же датчик.

2.4. Преобразовательная характеристика

Для каждого датчика можно вывести идеальное (теоретическое) соотношение, связывающее сигналы на его входе и выходе. В идеальном датчике, сигнал на его выходе S однозначно соответствует значению внешнего воздействия s . Это соотношение задано в виде таблицы, графика или математического выражения $S = f(s)$. Это теоретическое выражение иногда называют передаточной функцией [1], но, поскольку этот термин имеет совершенно иной смысл в теории автоматического управления, то **предпочтителен термин преобразовательная характеристика (ПХ)**. ПХ может быть как линейной, так и нелинейной (например, логарифмической, экспоненциальной или степенной). ПХ может зависеть от многих параметров, а может быть одномерной, т. е. связывать выходной сигнал лишь с внешним воздействием.

Линейная одномерная ПХ имеет следующий вид:

$$S = a + bs, \quad (2.7)$$

где a – константа равная значению S при $s = 0$, b – наклон прямой, или чувствительность датчика, S – та характеристика электрического сигнала (напряжение, ток, частота колебаний, фаза и т. д.), которую устройства дальнейшего преобразования сигналов воспринимают в качестве выходного сигнала датчика. Логарифмическая, экспоненциальная и степенная преобразовательные характеристики имеют, соответственно, следующий вид:

$$S = a + blns, \quad (2.8)$$

$$S = ae^{ks}, \quad (2.9)$$

$$S = a_0 + a_1sk, \quad (2.10)$$

где k – постоянное число.

Иногда ПХ датчика невозможно описать аппроксимирующими выражениями (2.8)–(2.10). Могут применяться полиномиальные аппроксимации более высоких порядков. Для нелинейных передаточных функций чувствительность b не является константой, как это было в случае линейных зависимостей. Для каждого конкретного значения входного сигнала b_0 ее можно определить в виде:

$$b = \frac{dS(s_0)}{ds}. \quad (2.11)$$

Для нестационарных датчиков имеется также зависимость чувствительности от времени (которая, чаще всего, не известна в аналитическом виде).

В рамках требуемой точности часто нелинейные датчики допустимо считать линейными внутри заданного ограниченного диапазона значений s . Для более широкого диапазона значений нелинейная ПХ представляется в виде нескольких отрезков прямых линий (кусочно-линейной аппроксимацией).

Чтобы определить, может ли данная ПХ быть представлена в выбранном виде линейной или иной модели зависимости, необходимо убедиться, что погрешность определения измеряемой величины по получаемым выходным сигналам с учетом этой модели не выходит за допустимые пределы.

Если на выходной сигнал датчика оказывают влияние несколько внешних воздействий, его ПХ становится многомерной. Примером датчика с двумерной ПХ является инфракрасный датчик температуры. Его передаточная функция связывает две температуры (T_b – абсолютную температуру объекта измерения и T_s – абсолютную температуру поверхности сенсорного элемента) с выходным напряжением V :

$$V = G(T_b^4 - T_s^4), \quad (2.12)$$

где G – константа. Из выражения (2.12) видно, что зависимость между температурой объекта и выходным напряжением (передаточная функция) является не только нелинейной (параболой четвертого порядка), но она также зависит от температуры поверхности чувствительного элемента. Для определения чувствительности такого датчика по отношению к температуре объекта, надо взять частную производную от выражения (2.12):

$$b = \frac{\partial V}{\partial T_b} = 4GT_b^3, \quad (2.13)$$

На рис. 2.1 ПХ по уравнению (2.6) показана графически. Из рисунка видно, что каждое значение выходного напряжения однозначно определяется по двум входным температурам.

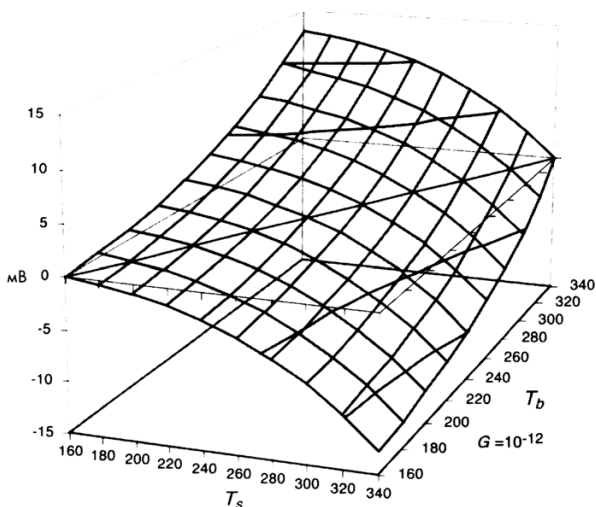


Рис. 2.1. Двумерная передаточная характеристика инфракрасного датчика [1]

Как правило, ПХ представляются в виде зависимости «выход от входа». Если датчик используется для количественного определения внешнего воздействия, необходимо получить инверсную зависимость – «вход от выхода». При линейной передаточной функции получить обратную зависимость несложно. Но в случае присутствия в системе нелинейностей эта задача сильно усложняется. Зачастую аналитического выражения, пригодного для вычислений, получить не удастся. Тогда снова привлекаются методы аппроксимации.

2.5. Диапазон выходных значений

Диапазон выходных значений (FSO) – алгебраическая разность между выходными электрическими сигналами, измеренными при максимальном и минимальном внешнем воздействии. В эту величину должны входить все возможные отклонения от идеальной передаточной функции. На рис. 2.2, а величина S_{FS} отображает диапазон выходных значений.

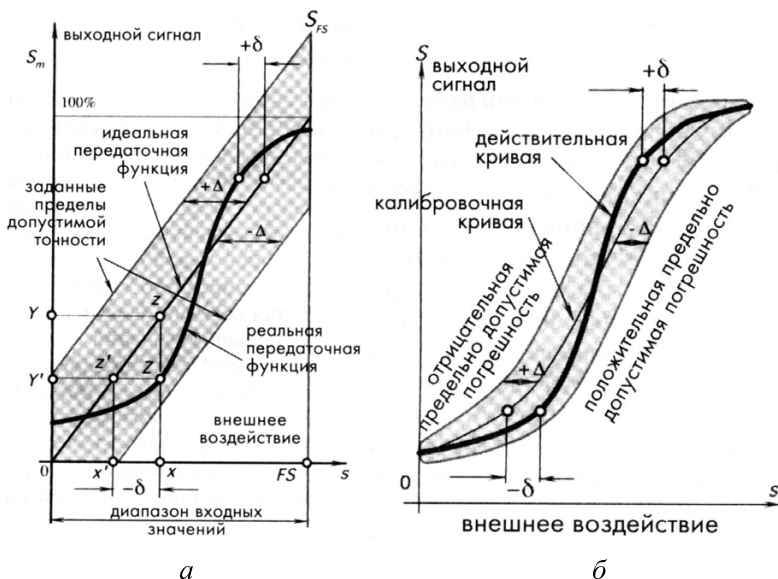


Рис. 2.2. Передаточная характеристика (а) и пределы допустимой погрешности (б). Погрешности определены относительно входных значений

2.6. Калибровка

Если производственные допуски на датчик и на схемы преобразования сигналов (СПС) превышают требуемую точность системы, улучшить ситуацию может калибровка конкретного датчика. Это уменьшает погрешность, но не гарантирует ее снижения до требуемого уровня. Например, требуется измерить температуру с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$ датчиком, по справочным данным обладающим погрешностью $\pm 1^\circ\text{C}$.

Калибровка может быть заводская (индивидуальная или выборочная), её также может осуществлять пользователь (для проверки исправности датчика или для более точных измерений – индивидуальная калибровка). Калибровке может подвергаться не только датчик, но и весь измерительный тракт в целом (полная калибровка). При полной калибровке определяются коэффициенты, описывающие ПХ не только датчика, но и всей системы в целом, включая датчик, СПС и АЦП. Математическое описание ПХ необходимо знать до начала проведения калибровки. Для линейной ПХ в процессе калибровки необходимо оп-

ределить коэффициенты a и b соотношения (2.1), для экспоненциальной – коэффициенты a и k соотношения (2.3) и т. д.

Рассмотрим пример линейной ПХ датчика температуры. Для нахождения двух коэффициентов необходимо иметь два уравнения. Для определения коэффициентов уравнения

$$v = a + bt. \quad (2.14)$$

датчик необходимо поместить в две среды с известной температурой, t_1 и t_2 , и измерить значения двух соответствующих напряжений: v_1 и v_2 . Следует подставить эти величины в выражение (2.14):

$$v_1 = a + bt_1, \quad (2.15)$$

$$v_2 = a + bt_2, \quad (2.16)$$

и найти значения констант:

$$b = \frac{v_1 - v_2}{t_1 - t_2}, \quad a = v_1 - bt_1. \quad (2.17)$$

Для получения температуры из выходного напряжения, значение измеренного напряжения необходимо подставить в инверсное выражение передаточной функции:

$$t = \frac{v - a}{b}. \quad (2.18)$$

Если одна из констант заранее определена с достаточной степенью точности, то достаточно провести калибровку только в одной точке.

Для нелинейных функций калибровку требуется проводить более чем в двух точках. Количество необходимых калибровок диктуется видом математического выражения. Если передаточная функция моделируется полиномиальной зависимостью, число калибровочных точек выбирается в зависимости от требуемой точности. Поскольку, как правило, процесс калибровки занимает довольно много времени, для снижения стоимости изготовления датчиков на производстве количество калибровочных точек задается минимальным.

Применение кусочно-линейной аппроксимации является другим подходом к калибровке нелинейных датчиков. Нелинейную передаточную функцию можно представить в виде комбинации линейных отрезков, каждый из которых обладает своими собственными коэффициентами a и b .

Для проведения калибровки датчиков важно иметь точные физические эталоны, позволяющие моделировать соответствующие внешние воздействия. Точность последующих изменений напрямую связана с точностью проведения калибровки. Ошибка калибровочных эталонов должна включаться в полную ошибку измерений.

2.7. Ошибка калибровки

Ошибка калибровки – это погрешность, допущенная производителем при калибровке датчика на заводе. Она носит систематический характер и добавляется ко всем реальным передаточным функциям. Ошибка калибровки сдвигает характеристику преобразования датчика в каждой точке на определенную величину. Она необязательно должна быть равномерной во всем диапазоне измерений и может зависеть от типа ошибки, допущенной в процессе калибровки. Для примера рассмотрим калибровку в двух точках реальной передаточной функции, показанной толстой линией на рис. 2.3. Для определения наклона и

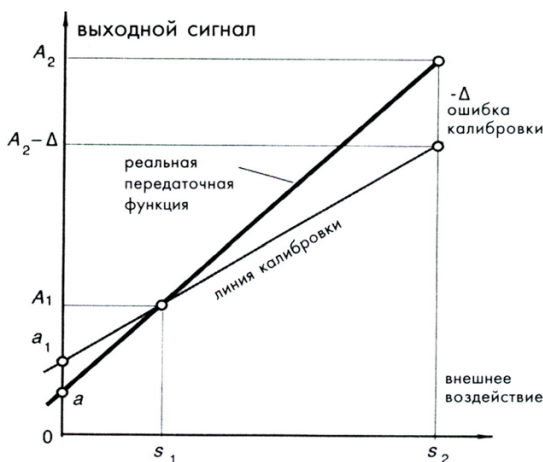


Рис. 2.3. Ошибка калибровки

начального сдвига функции на датчик подадим последовательно два внешних воздействия s_1 и s_2 и зарегистрируем два соответствующих выходных сигнала A_1 и A_2 . Первый сигнал был измерен абсолютно точно, однако, при определении второго сигнала была допущена по-

грешность – Δ , что привело к ошибкам при определении коэффициентов a и b . Полученное значение начального сдвига a_1 будет отличаться от реального значения a на величину:

$$\delta_a = a_1 - a = \frac{\Delta}{s_2 - s_1}. \quad (2.14)$$

а наклон будет определен с ошибкой:

$$\delta_b = -\frac{\Delta}{s_2 - s_1}. \quad (2.15)$$

2.8. Гистерезис

Гистерезис – это разность значений выходного сигнала для одного и того же входного сигнала, полученных при его возрастании и убывании (рис. 2.4). Например, пусть показания датчика перемещений при движении объекта слева направо отличаются на 20 мВ от его показаний при движении объекта в той же самой точке справа налево. Если чувствительность датчика составляет 10 мВ/мм, ошибка гистерезиса в единицах перемещения будет равна 2 мм. Типичной причиной возникновения гистерезиса является трение и структурные изменения материалов.

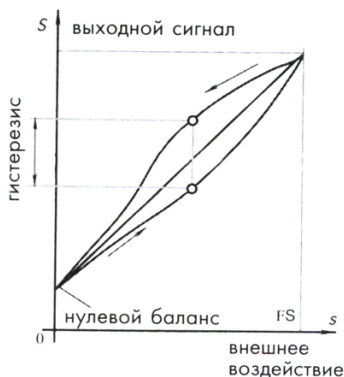


Рис. 2.4. Передаточная характеристика с гистерезисом

2.9. Нелинейность

Нелинейность определяют для датчиков, ПХ которых аппроксимируют прямой линией по уравнению (2.1). Это – максимальное отклонение L реальной ПХ от аппроксимирующей прямой линии. Иногда некоторые авторы ошибочно применяют термин «линейность», подразумевая «нелинейность».

При проведении нескольких циклов калибровки выбирается худшее из полученных значений нелинейности. Нелинейность выражается в процентах от максимального входного сигнала либо в единицах измеряемых величин. В зависимости от способа аппроксимации различают несколько типов линейаризации. Один из способов – проведение прямой через конечные точки передаточной функции (рис. 2.5, а, линия 1). При такой линейаризации ошибка нелинейности минимальна в конечных точках и максимальна в промежутке между ними.

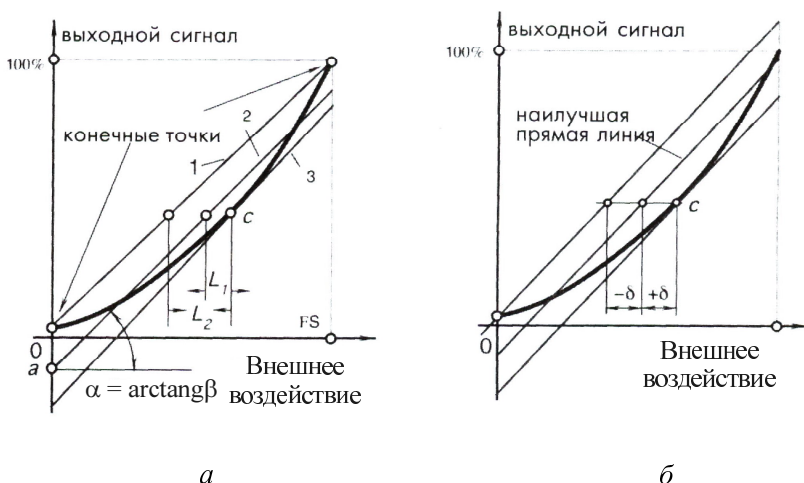


Рис. 2.5. Линейная аппроксимация нелинейной передаточной характеристики (а) и независимая линейаризация (б)

Другой способ линейаризации основан на применении метода наименьших квадратов (линия 2 на рис. 2.5, а). Для этого в широком диапазоне измеряемых величин (лучше в полном диапазоне) для ряда значений (n) внешних воздействий s измеряются выходные сигналы S . После чего, применяя формулу линейной регрессии, определяют значения коэффициентов a и b :

$$a = \frac{\sum S \sum s^2 - \sum s \sum s S}{n \sum s^2 - (\sum s)^2}, \quad b = \frac{n \sum s S - \sum s \sum S}{n \sum s^2 - (\sum s)^2} \quad (2.16)$$

где $\sum$ – это сумма n чисел.

На практике, в некоторых случаях, может потребоваться большая точность линеаризации в узком диапазоне входных сигналов, а вне этой зоны точность может быть ниже. В этом случае калибровку проводят в той области, где требуется повышенная точность, после чего через калибровочную точку с проводится аппроксимирующая линия (линия 3 на рис. 2.5, *а*). В результате наименьшее значение нелинейности достигается в зоне калибровочной точки, а ближе к концам диапазона измерения линейность значительно ухудшается. В данном методе аппроксимирующая линия часто является касательной к передаточной характеристике в точке калибровки *с*. Если известно выражение для реальной передаточной функции, наклон этой линии может быть найден по уравнению (2.5).

Метод независимой линеаризации часто называется «методом наилучшей прямой» (рис. 2.5, *б*). Он заключается в нахождении линии, проходящей посередине между двумя параллельными прямыми, расположенными, как можно, ближе друг к другу и охватывающими все выходные значения реальной передаточной функции.

В зависимости от метода линеаризации аппроксимирующие линии будут иметь разные коэффициенты a и b . Следовательно, значения нелинейности, полученные разными способами, могут серьезно различаться друг от друга.

2.10. Насыщение

Каждый датчик имеет свои пределы рабочих характеристик. Даже если он считается линейным, при определенном уровне внешнего воздействия его выходной сигнал перестанет отвечать приведенной линейной зависимости. В этом случае говорят, что датчик вошел в зону нелинейности или в зону насыщения (рис. 2.6).

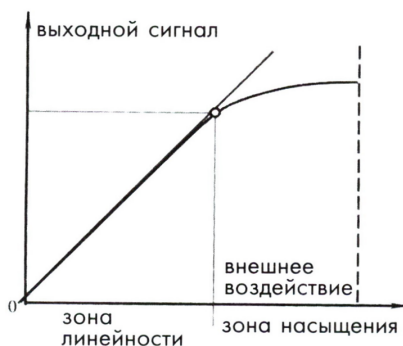


Рис. 2.6. Передаточная характеристика с насыщением

2.11. Воспроизводимость

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 (рис. 2.7, *а*). Обычно она выражается в процентах от максимального значения входного сигнала (FS):

$$\delta_r = \frac{\Delta}{FS} \times 100 \% . \quad (2.17)$$

Причинами плохой воспроизводимости результатов часто являются: тепловой шум, поверхностные заряды, пластичность материалов и т. д.

2.12. Мертвая зона

Мертвая зона – это нечувствительность датчика в определенном диапазоне входных сигналов (рис. 2.7, *б*). В пределах этой зоны выходной сигнал остается почти постоянным (часто равным нулю), или его изменения не превышают шум.

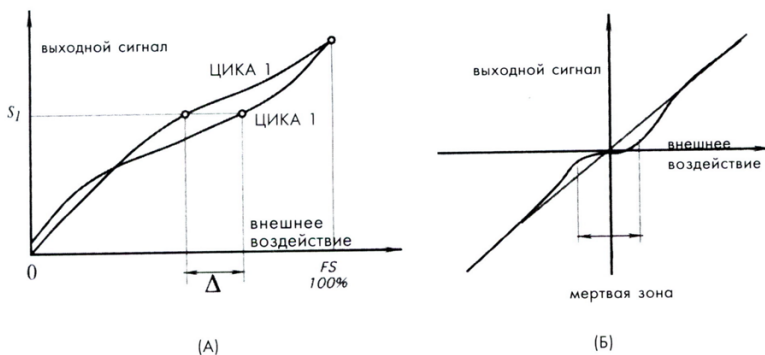


Рис. 2.7. Ошибка воспроизводимости:

а – одному и тому же выходному сигналу соответствуют разные воздействия; *б* – «мертвая зона» на передаточной характеристике

2.13. Разрешающая способность

Разрешающая способность характеризует минимальное изменение измеряемой величины, которое может почувствовать датчик. Она ограничивается снизу шумами, погрешностями и другими факторами. Могут иметь место лишь ступенчатые свойства ПХ (т. е. отсутствие изменений выходного сигнала при малых изменениях измеряемого воздействия), или, наоборот, зашумленность (т. е. наличие изменений выходного сигнала при неизменной измеряемой величине). Также при преобразовании любого сигнала в цифровой код происходит его разбивка на дискретные интервалы с отождествлением всех результатов в пределах каждого интервала. Величина минимального изменения входного сигнала, достоверно приводящая к обнаружимому изменению (или к приращению дискретного значения) выходного сигнала датчика, называется его разрешающей способностью (РС). Иногда разрешающая способность определяется в процентах от полной шкалы F_S (максимального значения входного сигнала). РС может меняться внутри диапазона измеряемых значений, поэтому, как правило, она определяется либо как средняя, либо как наихудшая величина. Термин РС может не вполне корректно применяться для описания величины, обратной той, которая дана выше, так же как погрешность порой описывают термином «точность». В частности, для датчиков с цифровыми выходными сигналами разрешающей способностью часто называют число бит слова данных N , или количество дискретных уровней 2^N . Например, в описании может быть информация, что разрешение датчика равно 8 бит или $2^N = 2^8 = 128$. Отсюда можно получить либо полный диапазон входных сигналов F_{SO} , либо оценить величину младшего значащего разряда (МЗР) из соотношения $F_{SO} = 2^N \times \text{МЗР}$. Встречающееся иногда в литературе утверждение, что датчик обладает бесконечно большой РС ошибочно. При этом авторы руководствуются ошибочным мнением, что, если на выходном сигнале не удастся определить различных ступеней, то это эквивалентно предельной ситуации бесконечно большого значения N .

На деле РС всегда ограничена снизу шумами и иными характеристиками отклонения датчика от идеального, а обратная величина $2^N = \text{РС} - 1$, тоже порой обозначаемая тем же термином, всегда ограничена сверху, т. е. конечна.

Следует отличать погрешность от РС. Датчик может обладать существенно большей погрешностью, чем разрешающей способностью, поскольку погрешность включает в себя и ошибки калибровки, и не-

линейность и иные факторы, приводящие к неверному определению измеряемой величины по выходному сигналу. Например, датчик резистивный температуры может позволять зафиксировать ее изменения на уровне $\pm 0,01^\circ\text{C}$, поскольку мостовая схема включения и стабильное питающее напряжение позволяет зафиксировать достаточно малые приращения сопротивления, а погрешность измерения при этом может иметь значение $\pm 1^\circ\text{C}$, поскольку ПХ этого датчика отличается от расчетной.

2.14. Специальные характеристики

Для некоторых датчиков необходимо указывать специальные характеристики входных сигналов. Например, для детекторов освещенности такой характеристикой является его чувствительность в пределах ограниченной оптической полосы. Следовательно, для таких датчиков необходимо определять спектральные характеристики.

2.15. Выходной импеданс

Выходной импеданс Z_{out} является характеристикой, указывающей, насколько легко датчик согласовывается с электронной схемой. Сопротивление, соответствующее выходному импедансу датчика, подключаются параллельно сопротивлению, характеризующему входной импеданс электронной схемы Z_{in} , (потенциальное соединение) или последовательно с ним (токовое соединение). Оба варианта соединений показаны на рис. 2.8.

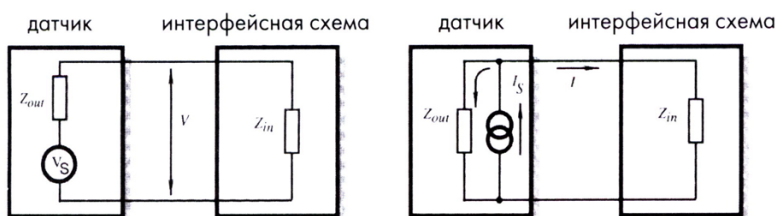


Рис. 2.8. Схемы соединения датчика с интерфейсной схемой:

а – датчик с выходным сигналом в виде напряжения; б – датчик с токовым выходом

Обычно входные и выходные импедансы представляются в комплексном виде, поскольку они, как правило, включают в себя активные

и реактивные компоненты. Для минимизации искажений выходного сигнала датчик с токовым выходом (рис. 2.8, б) должен иметь максимально возможный выходной импеданс, а его интерфейсная схема – минимальный входной импеданс. В случае потенциального соединения (рис. 2.8, а) датчику следует иметь низкий выходной импеданс, а интерфейсной схеме – высокий входной.

2.16. Сигнал возбуждения

Сигнал возбуждения – это электрический сигнал, необходимый активному датчику для работы. Сигнал возбуждения описывается интервалом напряжений и/или тока. Для некоторых типов датчиков также необходимо указывать частоту сигнала возбуждения и его стабильность. Выход сигнала возбуждения за приведенные пределы может привести к изменению ПХ датчика, и, следовательно, к искажению выходного сигнала.

2.17. Динамические характеристики

В стационарных условиях датчик полностью описывается характеристиками своей ПХ. На практике быстродействие датчика всегда ограничено. Любой датчик обладает параметрами, зависящими от времени, называемыми динамическими характеристиками. Если датчик имеет ограниченное быстродействие, он работает с динамической погрешностью. Отличие между статическими и динамическими погрешностями заключается в том, что последние всегда зависят от времени. Если датчик входит в состав измерительного комплекса, обладающего определенными динамическими характеристиками, внесение дополнительных динамических погрешностей может привести, в лучшем случае, к задержке отображения реального значения внешнего воздействия, а, в худшем случае – к возникновению колебаний, т. е. к нарушению устойчивости системы.

Время разогрева – это время между подачей на датчик электрического напряжения или сигнала возбуждения и моментом, когда датчик начинает работать, обеспечивая требуемую точность измерений. Многие датчики обладают несущественным временем разогрева. Однако некоторые детекторы, особенно работающие в устройствах с контролируемой температурой (термостатах), для своего разогрева требуют секунды, а то и минуты.

В теории автоматического управления (ТАУ) принято описывать взаимосвязь между входами и выходами устройства в виде линейных

дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. При решении этих уравнений можно определить динамические характеристики устройства. Кроме того, целесообразно использовать аппарат передаточных функций. В зависимости от конструкций датчиков, уравнения, описывающие их, могут иметь разный порядок.

Датчики нулевого порядка, имеющие линейную передаточную функцию по уравнению (2.1), можно описать следующими зависимостями от времени V .

$$S(t) = a + bs(t). \quad (2.18)$$

Коэффициент a называется смещением, a b – статической чувствительностью. Из вида уравнения видно, что оно описывает датчики, в состав которых не входят элементы, накапливающие энергию, такие как конденсаторы или массы. Датчики нулевого порядка относятся к устройствам «практически мгновенного» действия. Иными словами, у таких датчиков нет необходимости определять динамические характеристики. Все же вопрос о том, допустимо ли считать быстроедействие датчика «мгновенным», решается сопоставлением его запаздывания с запаздыванием других элементов, входящих в контур автоматического быстрогодействия.

Дифференциальные уравнения первого порядка описывают поведение датчиков, в состав которых входит один элемент, накапливающий энергию. Такие уравнения имеют вид:

$$b_1 \frac{dS(t)}{dt} + b_0 S(t) = s(t). \quad (2.19)$$

Типичный пример датчика первого порядка – датчик температуры, в котором роль накопительного элемента играет теплоемкость. Для описания датчиков первого порядка существует несколько способов. Но производители датчиков для этого чаще всего используют частотные характеристики, показывающие, насколько быстро датчик может среагировать на изменение внешнего воздействия. Для отображения относительного уменьшения выходного сигнала при увеличении частоты применяется амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), показанная на рис. 2.9, a . Для описания динамических характеристик датчиков часто используется граничная частота, соответствующая снижению выходного сигнала на 3 дБ, показывающая, на какой частоте происходит уменьшение выходного напряжения или тока на 30 %.

Эта граничная частота f_U , часто называемая верхней частотой среза, считается предельной частотой работы датчика.

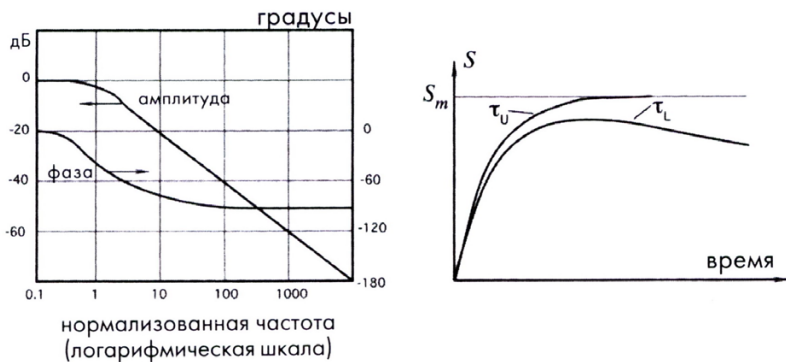


Рис. 2.9. Частотные характеристики (ЧХ):

a – ЧХ датчика первого порядка; b – ЧХ датчика с ограничениями по верхней частоте среза, где τ_u и τ_l – соответствующие постоянные времени

Частотные характеристики напрямую связаны с быстродействием датчика, выражаемого в единицах внешнего воздействия на единицу времени. Какие характеристики: АЧХ или быстродействие, используются для описания датчика, зависит от его типа, области применения и предпочтений разработчика.

Другой способ описания быстродействия заключается в определении времени, требуемого для достижения выходным сигналом датчика уровня 90 % от стационарного или максимального значения при подаче на его вход ступенчатого внешнего воздействия. Для датчиков первого порядка удобно использовать параметр, называемый постоянной времени. Постоянная времени τ является мерой инерционности датчика. В терминах электрических величин она равна произведению емкости на сопротивление: $\tau = CR$. В тепловых терминах под C и R понимаются теплоемкость и тепловое сопротивление. Постоянная времени, как правило, легко измеряется. Временная зависимость выходного сигнала датчика первого порядка имеет вид:

$$S = S_m [1 - \exp(-t / \tau)], \quad (2.19)$$

где S_m – установившееся значение выходного сигнала; t – время; e – основание натурального логарифма. Заменяя t на τ , получаем:

$$\frac{S}{S_m} = 1 - \frac{1}{e} = 0,6321. \quad (2.21)$$

То есть по истечении времени $t_1 = \tau$ выходной сигнал датчика достигает уровня, составляющего $\sim 63\%$ от установившегося значения. Аналогично можно показать, что по истечении времени $t_2 = 2\tau$ уровень выходного сигнала составит $\sim 86,5\%$, а после $t_3 = 3\tau$ до $\sim 95\%$.

Частота среза описывает фильтрующие свойства датчика и характеризует наибольшую (или наименьшую) частоту внешних воздействий, которую датчик может воспринять без искажений. Верхняя частота среза показывает, насколько быстро датчик реагирует на внешнее воздействие, а нижняя частота среза – с каким самым медленным сигналом он может работать. На рис. 2.9, б показана характеристика датчика, который имеет ограничения как по верхней, так и по нижней частоте среза. На практике для установления связи между постоянной времени датчика первого порядка и его частотой среза f_c , как верхней, так и нижней, используют простую формулу:

$$f_c = \frac{0,159}{\tau} . \quad (2.22)$$

Фазовый сдвиг на определенной фиксированной частоте показывает, насколько выходной сигнал отстает от внешнего воздействия (рис. 2.9, а). Сдвиг измеряется в градусах либо в радианах и обычно указывается для датчиков, работающих с периодическими сигналами. Если датчик входит в состав измерительной системы с обратными связями, необходимо знать его фазовые характеристики. Фазовый сдвиг датчика может снизить запас устойчивости по фазе всей системы в целом и привести к ее нарушению.

Дифференциальные уравнения второго порядка описывают поведение датчиков с двумя элементами, накапливающими энергию:

$$b_2 \frac{d^2 S(t)}{dt^2} + b_1 \frac{dS(t)}{dt} + b_0 S(t) = s(t) . \quad (2.23)$$

Примером датчика второго порядка является акселерометр, в состав которого входит масса и пружина.

Датчик, описываемый звеном второго порядка, может иметь резонансные свойства. В этом случае на выходах датчиков второго порядка после подачи на их входы ступенчатого воздействия появляются колебания. Они могут быть кратковременными, тогда говорят, что датчик демпфирован, или они могут длиться продолжительное время. Продолжительные колебания на выходе датчика являются свидетельством его неправильной работы, поэтому их следует избегать. Обычно датчик вто-

рого порядка характеризуется резонансной (собственной) частотой, которая выражается в герцах или радианах в секунду. На собственной частоте происходит значительное увеличение выходного сигнала датчика. Обычно производители указывают значение собственной частоты датчика и его коэффициент затухания (демпфирования). От резонансной частоты зависят механические, тепловые и электрические свойства детекторов. Обычно рабочий частотный диапазон датчиков выбирается либо значительно ниже собственной частоты (по крайней мере, на 60 %), либо выше ее. Однако для некоторых типов датчиков резонансная частота является рабочей. Например, детекторы разрушения стекла, используемые в охранных системах, настраиваются на узкую полосу частот в зоне частоты резонанса, характерную для акустического спектра, производимого разбивающимся стеклом.

Демпфирование – это значительное снижение или подавление колебаний в датчиках второго и более высоких порядков. Когда выходной сигнал устанавливается достаточно быстро и не выходит за пределы стационарного значения, говорят, что система обладает критическим затуханием, а ее коэффициент демпфирования равен единице (рис. 2.10). Когда коэффициент затухания меньше единицы, и выходной сигнал превышает установившееся значение, говорят, что демпфирование системы недостаточно. А когда коэффициент затухания больше единицы, и сигнал устанавливается гораздо медленнее, чем в системе с критическим затуханием, говорят, что оно излишне.

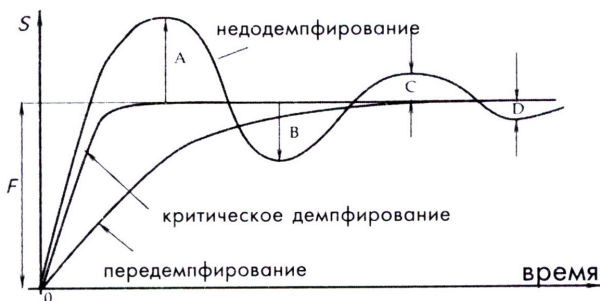


Рис. 10. Виды входных сигналов в датчиках с разным коэффициентом демпфирования

Для колебательного выходного сигнала, показанного на рис. 2.10, коэффициент затухания или демпфирования ζ определяется абсолютным значением отношения большей амплитуды к меньшей пары по-

следовательно взятых полуволн колебаний относительно установившегося значения, т. е. можно записать:

$$\zeta = \frac{F}{A} = \frac{A}{B} = \frac{B}{C} = \dots \quad (2.24)$$

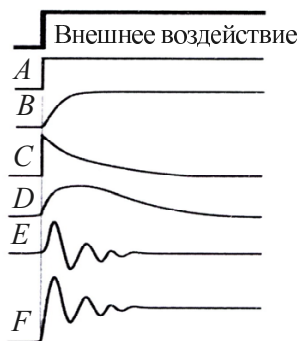


Рис. 2.11. Варианты выходных сигналов:

A – бесконечные верхняя и нижняя частоты; *B* – система первого порядка с ограниченной верхней частотой среза; *C* – система первого порядка с ограниченной нижней частотой среза; *D* – система первого порядка с ограниченными верхней и нижней частотами среза; *E* – система с узкой полосой частот (резонансная система); *F* – широкополосная система с резонансом

На рис. 2.11 приведены возможные варианты выходных сигналов датчиков в ответ на ступенчатое внешнее воздействие.

2.18. Факторы окружающей среды

Условия хранения – предельные значения факторов окружающей среды, воздействующих на датчик в течение допустимой длительности, при которых изменения его рабочих характеристик остаются в допустимых пределах, поэтому сохраняется его работоспособность.

Они устанавливают: диапазон температур хранения и влажности при этих температурах и иные требования, как «отсутствие конденсата». Могут указываться дополнительные условия хранения, например, максимальное давление, присутствие некоторых газов или отсутствие вредных испарений.

Краткосрочная и долгосрочная стабильность (дрейф) – характеристики точности датчиков. Краткосрочная стабильность описывает изменения рабочих характеристик датчика в течение минут, часов и даже дней. Выходной сигнал датчика может увеличиваться или уменьшаться, что может быть выражено через величину шума сверхнизкой частоты. Долгосрочная стабильность зависит от процессов старения, которые изменяют электрические, механические, химические и термические свойства материалов датчика. Долгосрочный дрейф параметров может измеряться достаточно длительными интервалами времени: месяцами и

годами. Долгосрочная стабильность является очень важной характеристикой для датчиков, используемых для прецизионных измерений. Скорость старения определяется условиями хранения и эксплуатации, а также тем, насколько хорошо элементы датчиков изолированы от окружающей среды, и какие материалы использовались для их изготовления. Интенсивное старение типично для датчиков, в состав которых входят органические компоненты, и не столь существенно для датчиков из неорганических элементов. Например, металлоксидные термисторы в стеклянных корпусах обладают лучшей долговременной стабильностью, чем такие же термисторы, покрытые эпоксидной смолой. Для повышения долговременной стабильности элементы датчиков подвергают термоциклической подготовке, моделирующей экстремальные условия работы. Например, датчик может периодически перемещаться из среды с температурой замерзания в среду с очень высокой температурой. Такая термоциклическая подготовка повышает стабильность характеристик датчиков, позволяет обнаружить скрытые дефекты и произвести отбраковку негодных устройств. Например, стабильность термисторов с эпоксидным покрытием значительно повышается, если перед калибровкой и установкой в прибор они в течение месяца выдерживались при температуре +150 °C.

В перечень условий окружающей среды, воздействующих на датчики, практически никогда не входят физические параметры, измеряемые датчиками. Например, для датчика, определяющего давление воздуха, учитываются следующие факторы окружающей среды: температура воздуха и рядом расположенных объектов, влажность, вибрации, ионизирующая радиация, электромагнитные поля, гравитационные силы и т. п. Все эти параметры не только могут, но и влияют на рабочие характеристики датчика. При этом необходимо учитывать, как динамические, так и статические составляющие этих факторов. Многие из параметров окружающей среды имеют мультипликативную природу, т. е. они влияют на передаточную функцию датчика, например, меняют его коэффициент усиления. Одним из подтверждений этого эффекта является поведение резистивного датчика напряжений, чувствительность которого увеличивается с ростом температуры.

Очень важным требованием для современных датчиков является обеспечение их стабильной работы в разнообразных условиях окружающей среды. Поэтому разработчики, а также экспериментаторы всегда должны учитывать все возможные внешние воздействия, способные повлиять на рабочие характеристики датчиков. Например, на выходе пьезоэлектрического акселерометра могут появляться паразитные сигналы из-за: резкого изменения окружающей температуры,

электростатического разряда, образования электрических зарядов (эффект трибоэлектричества), вибрации соединительных проводов, электромагнитной интерференции (ЭМИ) и т. п. Даже если производитель датчика не указал эти факторы, экспериментатор должен проверить его поведение в конкретных условиях эксплуатации и в случае необходимости (при реальном ухудшении рабочих характеристик от влияния внешних факторов) принять соответствующие меры (см. четвертую главу), на пример поместить датчик в защитный корпус, использовать электрический экран, применить теплоизоляцию или термостат.

Температура окружающей среды влияет на рабочие характеристики датчиков, поэтому всегда должна приниматься во внимание. Рабочий диапазон температур – это интервал окружающих температур, задаваемых верхним и нижним предельными значениями (например, $-20 \dots +100\text{ }^{\circ}\text{C}$), внутри которого датчик работает с заданной точностью. Передаточные функции многих датчиков сильно зависят от окружающей температуры. Для снижения температурных погрешностей в состав самих датчиков или в схемы преобразователей сигналов часто встраиваются специальные компенсационные элементы. Самый простой способ определения допусков по температуре заключается в установлении интервалов внутри рабочего диапазона температур, для каждого из которых указывается индивидуальная погрешность. Например, в паспортных данных может быть указано, что в интервале температур $0 \dots 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ точность датчика составляет 1 %, в интервалах $-20 \dots 0^{\circ}\text{C}$ и $+50 \dots 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 2 %, в остальных интервалах в пределах диапазона измеряемых температур ($-40 \dots +150\text{ }^{\circ}\text{C}$) – 3 %. Температура окружающей среды также влияет на динамические характеристики, особенно в случаях, когда применяется вязкостное демпфирование. Сравнительно быстрые изменения температур могут привести к появлению паразитных сигналов на выходах датчиков. Например, пироэлектрический чувствительный элемент, используемый в детекторах движения, практически не реагирует на медленное изменение окружающей температуры. Однако при быстром скачке температуры на его выходе может появиться электрический сигнал (ток), распознаваемый электронными цепями как отклик на внешнее воздействие, что приводит к ошибкам детектирования.

Погрешность саморазогрева появляется в датчиках, нагревающихся от сигнала возбуждения настолько, что это начинает влиять на его точностные характеристики. Например, через термисторный датчик температуры необходимо пропускать электрический ток, что приводит к рассеянию тепла внутри его конструкции. При этом степень саморазогрева датчика зависит от его конструкционных особенностей и от условий окружающей среды: либо это сухой воздух, либо жидкость и т. д.

Саморазогрев датчика приводит к появлению ошибок при измерении температуры, поскольку термистор начинает работать как источник дополнительной тепловой энергии. Самый сильный разогрев датчиков наблюдается в среде стоячего воздуха. Для термисторов производители часто указывают погрешность саморазогрева при работе в воздухе, стоячей жидкости и других средах.

Увеличение температуры датчика относительно температуры окружающей среды можно найти при помощи формулы:

$$\Delta T = \frac{V^2}{(\xi \nu c + \alpha) R}, \quad (2.25)$$

где ξ – плотность массы датчика, c – удельная теплоемкость, ν – объем датчика, α – коэффициент теплопроводности (описывающий взаимосвязь датчика с внешней средой), R – электрическое сопротивление, V – эффективное напряжение на сопротивлении. Это выражение часто используется разработчиками для оценки погрешности от саморазогрева. Из выражения (2.25) видно, что для увеличения коэффициента α необходимо обеспечивать плотный контакт датчика с объектом измерения при одновременном увеличении площади контакта, для чего можно применять теплопроводные смазочные и адгезионные вещества. С целью уменьшения погрешности саморазогрева предпочтительнее использовать высокорезистивные датчики и датчики с низким рабочим напряжением.

2.19. Надежность

Надежность – это способность датчика выполнять требуемые функции при соблюдении определенных условий в течение заданного промежутка времени. Если использовать статистические термины, можно дать следующее определение: надежность – это вероятность того, что устройство будет функционировать без поломок в течение указанного интервала времени или заданного количества циклов. Следует отметить, что надежность не является характеристикой дрейфа или шума. Она отражает время до выхода устройства из строя (отказа), либо временного, либо постоянного при соблюдении регламентированных условий эксплуатации.

Несмотря на то, что надежность является очень важной характеристикой, она редко указывается производителями датчиков. Возможно, причина этого заключается в отсутствии общепринятых способов ее измерения. В США для многих электронных приборов в качестве способа

определения эксплуатационной надежности применяется процедура вычисления среднего времени между отказами (СВМО), описанная в стандарте MIL-HDBK-217. Эта процедура основана на определении СВМО всего устройства после вычисления СВМО его отдельных элементов, при этом необходимо учитывать влияние внешних факторов: температуры, давления, механических напряжений, степени экранирования и т. д. К сожалению, процедура нахождения СВМО не позволяет оценить надежность напрямую, и такую характеристику трудно применять на практике. Поэтому часто для определения надежности датчиков их подвергают квалификационным испытаниям, которые проводятся в наихудших условиях. Например, датчики заставляют непрерывно работать при максимальной рабочей температуре в течение 1000 часов (эта методика описана в стандарте MIL-STD-883). Но этот метод не учитывает ситуации резких изменений внешних условий, например, быстрого повышения температуры. Он имитирует работу датчика в модели реального окружения, но при этом стремится сжать годы в недели. Перед такими квалификационными испытаниями стоят три задачи: оценка СВМО, определение самого уязвимого места конструкции (места первой поломки) для последующего усовершенствования датчика и нахождение эксплуатационного срока жизни всей системы.

Другим возможным способом «ускоренного старения» является использование той же самой совокупности параметров, что и в реальных режимах эксплуатации, включая максимальную нагрузку и циклы включения/выключения, но проверку системы проводить в расширенных диапазонах окружающих условий (по сравнению с регламентированными в паспортных данных). При этом допускается, чтобы рабочие характеристики датчиков выходили за пределы, указанные в их описаниях, но в нормальных условиях эксплуатации они должны возвращаться к требуемым значениям. Например, если в документации говорится, что датчик должен работать при температуре, не превышающей 50° С, и наибольшей относительной влажности 85 % при максимальном рабочем напряжении + 15 В, его следует тестировать в циклическом режиме при температуре 100° С, относительной влажности 99 % и напряжении + 18 В. Для оценки количества циклов (n) может применяться следующая эмпирическая формула, предложенная в Sandstrand Aerospace, (Rockford, IL) и Interpoint Corp. (Redmond, WA) [1]:

$$n = N \left(\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\text{test}}} \right)^{2,5}, \quad (2.26)$$

где N – приблизительное количество циклов за весь эксплуатационный период; $\Delta T_{\max}$ – максимально возможная флуктуация температуры; а ΔT_{test} – максимальная флуктуация температуры, зафиксированная во время тестирования. Например, пусть нормальная рабочая температура датчика равна 25°C , максимальная рабочая температура, указанная в описании, составляет 50°C , тестирование проводилось при температуре 100°C . Также было оценено, что датчик за период своей эксплуатации (допустим, 10 лет) подвергается 20000 рабочим циклам, тогда количество тестовых циклов, определенное по формуле (2.26), составит:

$$n = 20000 \left(\frac{50 - 25}{100 - 25} \right)^{2,5} = 1283. \quad (2.27)$$

Это значит, что для тестирования, моделирующего весь срок эксплуатации, проведенного при вышеуказанных условиях, потребуется 1300 циклов вместо 20000. Следует отметить, что коэффициент 2,5 получен для мест соединения припоем, поскольку именно эти элементы наиболее подвержены выходу из строя. Но некоторые датчики не имеют паяных соединений, а элементы других устройств обладают более высоким коэффициентом, чем 2,5 (например, соединения при помощи электропроводных эпоксидных смол), поэтому на практике этот коэффициент может либо слегка снижаться, либо слегка увеличиваться. В результате тестирования на «ускоренное старение», надежность выражается через вероятность отказов. Например, если при проведении тестирования 100 датчиков два из них вышли из строя (при оцененном сроке службы 10 лет), можно утверждать, что надежность данного типа устройств составляет 98 % в течение первых 10 лет их эксплуатации. Датчик, в зависимости от области применения, может подвергаться воздействию и других факторов окружающей среды, которые потенциально могут менять его рабочие характеристики или помогать обнаруживать скрытые дефекты. Поэтому иногда применяются следующие виды дополнительных испытаний:

Тестирование при высокой температуре и высокой влажности при максимальном напряжении питания. Например, датчик заставляют работать при максимально допустимой температуре и относительной влажности 85 – 90 % в течение 500 часов. Такое тестирование является очень полезным для обнаружения загрязнений и оценки целостности корпусов устройств. Срок службы датчиков часто определяется по тесту ускоренного старения, проводимого при температуре 85°C и относительной влажности 85 %. Такую проверку часто называют «тестированием 85–85».

Для моделирования неблагоприятных условий окружающей среды при проверке надежности соединений: проводных, клеевых и т. п., датчики часто подвергаются воздействию механических ударов и вибрациям. Для получения высоких значений ускорений моделируется падение датчика. Часто требуется проводить такие испытания относительно разных осей устройства. Частота гармонических колебаний, прикладываемых к датчику при вибрационном тестировании, должна изменяться в интервале, включающем его собственную частоту. В США в оборонной промышленности при проведении механических тестов часто используются методы 2016 и 2056 стандарта 750.

Для моделирования экстремальных условий хранения и перевозок датчик, как минимум, 1000 часов выдерживается при очень высоких температурах ($+100^{\circ}\text{C}$), либо при очень низких (минус 40°C). Этот вид тестирования проводится, как правило, на неработающих устройствах. Выбор верхнего и нижнего температурных пределов должен проводиться в соответствии с физической природой датчиков. Например, для пирозлектрических TGS датчиков фирмы Philips, характеризуемых точкой Кюри $+60^{\circ}\text{C}$, эта температура никогда не должна превышать $+50^{\circ}\text{C}$, что всегда должно быть четко указано на их корпусах.

Для проверки поведения датчиков при экстремально изменяющихся внешних условиях их подвергают воздействию теплового шока или циклических температур. Например, устройство находится в течение 30 минут в среде с температурой -40°C , после чего быстро перемещается на 30 минут в среду с температурой $+100^{\circ}\text{C}$ и так много раз. Количество таких циклов, как правило, лежит в пределах 100 ... 1000. Этот тест помогает обнаруживать дефекты разных типов соединений и проверяет целостность корпуса.

Для моделирования условий морских перевозок датчики могут подвергаться воздействию соляных туманов в течение определенного интервала времени (например, 24 часов). Такое тестирование помогает определять устойчивость устройств к коррозии и обнаруживать дефекты корпусов.

2.20. Характеристики датчиков, диктуемые условиями их применения

Для возможности применения в различных областях важными становятся следующие характеристики датчиков: их конструкция, вес и габариты. Если для датчиков главными параметрами являются точность и надежность, такая характеристика, как стоимость отходит на второй план. Так если устройства предназначены для систем жизне-

обеспечения, оборонных комплексов или космических кораблей, их высокая стоимость всегда оправдана предъявляемыми требованиями по точности и надежности. Однако существует ряд других областей применения датчиков, где их стоимость является основополагающей.

2.21. Статистическая оценка

В этом мире нет ничего совершенного. Все наши знания о материалах носят весьма приблизительный характер, и, на самом деле, они представляют собой не совсем то, что мы думаем о них. Все станки тоже весьма несовершенны и никогда не производят детали в точном соответствии с чертежами. У всех компонентов любых устройств существует дрейф характеристик, связанный с окружающими условиями и старением. Внешние помехи могут влиять на рабочие параметры систем и менять их выходные сигналы. Работники также неидеальны, и всегда присутствует человеческий фактор. Производители борются за однородность и согласованность технологических процессов, но, несмотря на это, ни один из производимых элементов не является совершенным и говорить о значениях их параметров можно только с некоторой степенью определенности. Любые измерительные комплексы состоят из множества компонентов, включая датчики. Поэтому вне зависимости от того, насколько точно проводились исследования, можно говорить лишь о приблизительной оценке значения реальной физической величины, являющейся объектом измерений (т. е. внешним воздействием). Результаты измерений могут рассматриваться законченными, только когда они сопровождаются статистической оценкой полученных данных, поскольку никогда не бывает стопроцентной уверенности в точности определенных значений.

В зашумленных условиях показания датчика s' будут отличаться от реального значения внешнего сигнала s на величину ошибки измерения δ , которую можно выразить в следующем виде:

$$\delta = s' - s. \quad (2.27)$$

Необходимо всегда четко понимать разницу между погрешностью измерений, которую можно определить при помощи формулы (2.27), и статистической ошибкой результатов. Погрешность измерений можно до некоторой степени снизить за счет корректировки систематических составляющих. Но, несмотря на достижение малой величины погрешности, статистическая ошибка при этом может быть очень высокой. В таком случае мы не можем считать результаты измерений достовер-

ными. Другими словами можно сказать, что погрешность измерений – это то, что мы реально получаем во время проведения конкретных измерений, а статистическая ошибка – это то, насколько мы можем поверить полученным результатам.

Международный Комитет по Мерам и Весам считает, что статистические ошибки можно разделить на две группы, хотя между группами А и Б нет четких границ [2, 3]:

Группа А: погрешности, оцениваемые статистическими методами.

Группа Б: погрешности, оцениваемые другими методами.

Статистическая ошибка типа А обычно определяется по стандартному отклонению s_i , равному положительному квадратному корню из статистически определенной дисперсии $\sum s_i^2$, деленной на число измерений v_i . Для отдельных компонентов стандартная статистическая ошибка e_i обычно равна s_i . Стандартная ошибка показывает вклад каждого компонента в общую статистическую ошибку.

Для оценки дисперсии обычно применяют статистическую обработку результатов измерений. Для этого методом наименьших квадратов находят уравнение зависимости, наиболее точно описывающей полученные экспериментальные данные, и определяют отклонения каждого измеренного значения от полученной таким образом осредненной кривой.

Для определения статистической ошибки типа Б обычно используют всю доступную информацию, включающую:

- Все данные, полученные в предыдущих измерениях,
- Знания, полученные из анализа характеристик и поведения аналогичных датчиков, использования подобных материалов и инструментов,
- Спецификации, выданные производителем,
- Данные, полученные в процессе калибровки,
- Статистические данные, полученные из справочников и другой литературы.

Для получения более подробной информации, связанной с определением статистических ошибок измерений, рекомендуем обратиться к специализированным литературным источникам, например, [4].

После получения оценок всех статистических погрешностей их необходимо объединить и определить полную стандартную статистическую ошибку. Это можно сделать при помощи закона распространения статистических погрешностей, который заключается в нахождении

квадратного корня из суммы квадратов всех компонентов статистических ошибок:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} . \quad (2.28)$$

где n – число компонентов полной стандартной статистической ошибки.

При вычислении полной статистической погрешности по данной схеме необходимо учитывать ошибку каждого компонента измерительной цепи: датчика, интерфейсной схемы, экспериментальной установки и самого объекта измерений. Все это должно быть выполнено для разных условий окружающей среды, включая температуру, влажность, атмосферное давление, колебания в сети питания, шумы при передаче данных, старение и многие другие факторы.

Вопросы для самоконтроля

1. Какими характеристиками описываются свойства датчика?
2. Что такое «передаточная функция»? Что иногда называют «передаточной функцией датчика»? Какой термин более предпочтителен для этой функции и почему?
3. Что описывает диапазон измеряемых значений, как он определяется, в каких величинах выражается? Как следует учитывать эту величину при проектировании? Исходя из каких соображений, эту величину следует задавать при составлении технического задания?
4. Какой характеристикой корректно описывать точность датчика? Что эта характеристика означает, как определяется и задается, в каких величинах измеряется?
5. Что называют преобразовательной характеристикой датчика? Какие виды преобразовательных характеристик датчиков вы знаете? Как могут задаваться эти характеристики, в каких величинах измеряются?
6. Чем определяется диапазон выходных значений датчика.
7. Для чего выполняется калибровка датчика? Какие виды калибровки вы знаете? В чем они состоят?
8. Как связано теоретическое математическое описание с процессом и результатом калибровки?
9. Чем характерна калибровка при линейной преобразовательной характеристике? Как она выполняется?
10. Как выполняется кусочно-линейная аппроксимация при калибровке?

11. Как (и чем) определяется и как учитывается в дальнейшем ошибка калибровки?

12. Как предполагаемое использование датчика влияет на процесс калибровки?

13. Что означает термин «насыщение» датчика?

14. Что означает «воспроизводимость» характеристик датчика? Чем это понятие отличается от понятия «стабильность», «точность», «погрешность» и «дрейф» характеристик?

15. Что такое «мертвая зона» датчика?

16. Что означает «разрешающая способность» датчика? Какие другие характеристики могут заменить эту характеристику, и какова в этом случае между ними взаимосвязь?

17. Приведите несколько примеров специальных характеристик датчика.

18. Что такое «выходной импеданс» датчика? Для чего и как его учитывать?

19. Что означает «сигнал возбуждения» датчика?

20. Как описываются и для чего учитываются динамические характеристики датчиков?

21. Как могут сказываться на режиме работы и на сохранности при хранении датчика факторы окружающей среды? Чем регламентируются эти факторы?

22. Как задаются требования по надежности датчика? Для чего задавать эти требования и как их учитывать?

23. Приведите примеры характеристик датчиков, диктуемых условиями применения.

24. Как и для чего применяется статистическое оценивание датчиков?

25. Каким образом учитываются статистические характеристики отдельных компонент погрешности в итоговой величине? Для какого случая это правило приемлемо?

3. ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ

3.1. Датчики температуры фирмы Philips

Отечественной промышленностью выпускаются полупроводниковые датчики температуры *K1019EM1*, выходное напряжение которых пропорционально температуре Кельвина с чувствительностью 10мВ/°К. **Погрешность** измерения температуры указывается изготовителем на уровне 1°С, **стабильность** характеристики за 8–12 часов может оказаться выше в малом диапазоне температур.

Зарубежной промышленностью выпускается ряд микросхем, формирующих напряжение или ток, пропорциональные температуре.

Можно рекомендовать датчики фирмы *Analog Devices* AD780, AD590, AD592 как надёжные, простые в использовании и достаточно точные [23], которые рассмотрим в соответствующем разделе.

Параметры датчиков температуры фирмы *Philips* приведены в табл. 3.1. и 3.2. (сокращенно). Обобщенная зависимость сопротивления от температуры дана в графическом виде (см. рис. 3.1), индивидуальные характеристики для каждого типа имеются в справочниках [2].

Таблица 3.1

Наименование	Диапазон измеряемых температур, °С	$R_{\min}$ при $T = 25^{\circ}\text{C}$, Ом	$R_{\max}$ при $T = 25^{\circ}\text{C}$, Ом	Погрешность при $T = 25^{\circ}\text{C}$, $\pm^{\circ}\text{C}$
КТУ81/110	–55...+150	990	1010	1,27
...				
КТУ81/221		1960	2000	1,27
...				
КТУ82/110	–55...150	990	1010	1,27
...				
КТУ82/222		1960	2000	1,27
...				

Окончание табл. 3.1

Наименование	Диапазон измеряемых температур, °C	$R_{\min}$ при $T = 25^{\circ}\text{C}$, Ом	$R_{\max}$ при $T = 25^{\circ}\text{C}$, Ом	Погрешность при $T = 25^{\circ}\text{C}$, $\pm^{\circ}\text{C}$
КТУ83/110	–55...+175	990	1010	1,27
...				
КТУ84/130	–40...+300	577	629	5,84
КТУ84/150		565	641	8,54
КТУ84/151		565	611	5,25

Таблица 3.2

Наименование	$I_{\max}$ при $t = 25^{\circ}\text{C}$, мА	$I_{\max}$ при $t = 150^{\circ}\text{C}$, мА	Время отклика, с		Тип корпуса
			в воде	в воздухе	
КТУ81/110	10	2	5	30	ТО-92
...					
КТУ81/250					
КТУ82/110	10	2	1	7	ТО-92
...					
КТУ82/120					
КТУ83/110	10	2	1	20	SOD-68
...					
КТУ84/151					

Эта характеристика не линейна, и лишь при небольшом диапазоне измерений можно пользоваться ее линейной аппроксимацией.

Основное назначение этих датчиков – мониторинг температуры силовых узлов РЭА, микропроцессоров и микроконтроллеров, электродвигателей, деталей двигателей внутреннего сгорания и их эксплуатационных жидкостей, бытовых и промышленных тепловых установок, узлов систем охлаждения и кондиционирования и более, где тепловые удары приводят к выходу компонентов из строя. Диапазон измеряемых температур составляет –55...+150 °C (а последние три типа – до +300°C). К их главным достоинствам следует отнести невысокую стоимость, приемлемую для большинства приложений точность, близкую к линейной характеристику, экстремально высокую надежность и долговременную стабильность параметров, несколько вариан-

тов конструктивного исполнения (для монтажа на печатную плату и непосредственного закрепления на поверхность контролируемого компонента).

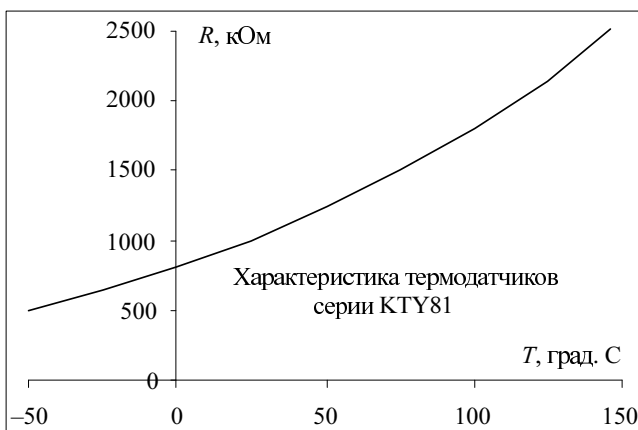


Рис. 3.1. Обобщенная характеристика датчиков температуры

Чтобы решить задачу не нужно знать все способы ее решения, достаточно одного. Аналогично, нет необходимости знать параметры всех датчиков, **достаточно выбрать наилучшие**. Как правило, при единичной разработке, цена датчика не существенна на фоне других экономических показателей. Номинальное значение сопротивления также не важно. Важны лишь погрешность, быстродействие, температурный диапазон, размеры датчика. Иногда также имеет значение форма датчика и иные показатели. Поэтому для каждого типа датчиков достаточно выделить наилучших представителей, а информацию о других датчиках этого же типа игнорировать.

В табл. 3.1 наиболее интересны три типа датчиков:

1. КТУ84/151 (–/121, –/122, –/210, –/221, –/222), у которых наименьшая погрешность среди группы с наибольшим температурным диапазоном;
2. КТУ83/110, у которых наибольший температурный диапазон в группе с наименьшей погрешностью;
3. КТУ82/110 (–/121, –/122, –/220, –/222, –/250), у которых наименьшее время отклика в воздухе.

Примечание: Согласно ГОСТ 8.011-72, на который имеются ссылки в действующем ГОСТ 8.009-84, погрешности приводят к величинам, выражаю-

щимися одной или двумя значащими цифрами. Если первая из отбрасываемых цифр больше или равна пяти, а за ней есть значащие цифры, то последнюю из сохраняемых цифр увеличивают на единицу. Если отбрасывается цифра пять, а за ней нет значащих цифр, то последнюю цифру, если она четная, оставляют неизменной, а если она нечетная, увеличивают на единицу. Если первая из отбрасываемых цифр меньше пяти, то последнюю сохраняемую цифру не меняют. По этому правилу погрешность, равная 1,27, так же, как и погрешность, равная 1,31, должна быть заменена значением 1,3. Можно также пользоваться стандартом МИ 1317-86.

3.2 Интегральные цифровые термометры фирм Philips, Texas Instruments и Maxim

Объединение на одном кристалле чувствительного элемента, цепи коррекции нелинейности, АЦП, стандартного интерфейса для подключения к микроконтроллеру и стабилизатора питания в этих приборах позволило значительно упростить схему устройства, повысить его надежность и снизить стоимость. Некоторые микросхемы термометров дополнительно содержат встроенную оперативную память и схему слежения, для контроля выхода температуры за установленное пользователем пороговое значение.

Интегральный термометр LM75A, производства Philips Semiconductors, pin-to-pin совместим с промышленным стандартом LM75, но имеет более высокое разрешение и расширенный диапазон напряжений питания. Микросхема содержит чувствительный элемент, 11-ти битный дельта-сигма АЦП, схему сброса, тактовый генератор, не требующий внешних компонентов, а также регистр конфигурации, измеренной температуры, пороговой температуры, гистерезиса и логику управления и реализации I2C протокола (три адресных вывода позволяют присвоить индивидуальный адрес устройству, обеспечивая подключение на шину до восьми термометров). Кроме этого ЧИП включает цифровой компаратор с каскадом усиления на полевом транзисторе с открытым стоком.

Двухканальный термометр NE1617(NE1618), производства Philips Semiconductors, осуществляет температурный мониторинг как собственный, так и удаленного объекта, при помощи внешнего датчика. Обе температуры фиксируются в соответствующих регистрах, затем считываются по 2-х проводной SMB шине. Кроме этого, имеется система слежения, для формирования сигнала тревоги, в случае перехода температуры любого канала через запрограммированный порог. При по-

мощи двух выводов с тремя состояниями, устройству задается один из девяти возможных адресов на шине. Перевод термометра в дежурный режим выполняется как по SMB шине, так и через внешний вывод.

Перспективное семейство сверхминиатюрных, сверхмалопотребляющих цифровых термометров для систем с батарейным питанием представлено компанией Texas Instruments. Устройства содержат полупроводниковый температурный сенсор, 12-ти битный АЦП, тактовый генератор, регистр конфигурации, регистр измеренного значения температуры, регистры верхнего и нижнего порогового значений температуры, схему сброса и логику реализации последовательного интерфейса. У всех ИМС этого семейства имеется схема слежения, формирующая сигнал тревоги, при переходе измеряемой температуры за определенное пользователем пороговое значение. К одному из основных достоинств следует отнести возможность выбора пользователем разрядности АЦП, и соответственно времени преобразования.

Следует обратить внимание, что время преобразования характеризует лишь быстродействие АЦП, но не быстродействие датчика, поскольку последнее ограничивается временем отклика. Так для всех рассмотренных датчиков время отклика составляет единицы секунд. Наиболее любопытен датчик температуры фирмы MAXIM DS1624, содержащий 13-разрядный АЦП. Основные параметры цифровых термометров приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Наименование	Диапазон измеряемых температур	Погрешность в диапазоне внешн. темп. – 25...100 °C, ± °C	Разрешение, ± °C	Время преобразо- вания, мс
LM75A	–55...+150	2	0,125	100
LM75AD	–55...+150	2	0,125	100
NE1617ADS	0...+120	2	1	170
NE1617DS	0...+120	2	1	170
NE1618	0...+120	2	1/0,125	150/750
TMP100	–55...+125	2	0,0625	75–600
TMP101	–55...+125	2	0,0625	75–600
TMP121	–40...+125	1,5	0,0625	480
TMP122	–40...+125	1,5	0,0625	30–240
DS1624	–55...+125	<<0,5	0,03125	400–1000

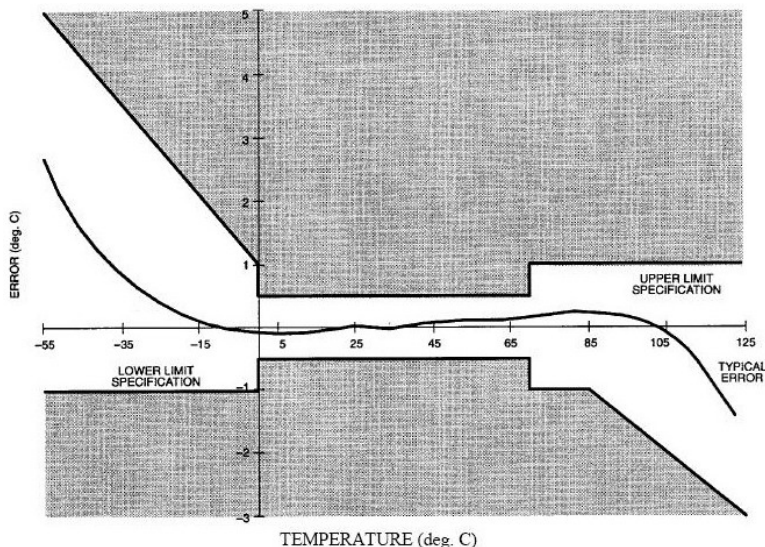


Рис. 3.2. Зависимость погрешности датчика DS1624 от температуры

На рис. 3.2. приведена зависимость погрешности датчика DS1624 от температуры. Видно, что в диапазоне от -15 до $+70$ °C погрешность датчика существенно меньше, чем $0,5$ °C, причем, она может быть снижена индивидуальной калибровкой.

3.3. Температурные датчики фирмы Analog Devices

Интегральные датчики температуры с токовым или потенциальным выходом характеризуются параметрами, представленными в табл.3.4 (аналоговые) и в табл. 3.5 (цифровые датчики). В этих таблицах применены следующие обозначения температурных диапазонов:

- C – Commercial (коммерческий) – от 0 °C до $+70$ °C ;
- I – Industrial (промышленный) – от -40 °C до $+85$ °C ;
- M – Military (военный) – от -55 °C до $+125$ °C ,
- M+ – в данном случае от -55 °C до $+150$ °C ;
- I+ – в данном случае от -20 °C до $+105$ °C .

Для последнего датчика дрейф характеристики не дан, но его можно оценить. Дрейф выходного сигнала обозначен, как 15 ppm/°C типичный, а типовой -40 ppm/°C. Номинальный выходной сигнал

Таблица 3.4

Тип	Токовая (потенци- альная) чувств-ть I_{OUT} , мкА/К (U_{OUT} , мВ/К)	Ошибка калибровки максималь- ная, °С	Нелиней- ность мак- сим., °С	Воспроизво- димость (долговре- менный дрейф, °С (°С/мес.)	Темпера- турный диапазон
AC2626	1	0,5–5	0,3 – 1,5	0,1	С, М
AD590J	1	5	1,5	0,1	М +
AD590K	1	2,5	0,8	0,1	М +
AD590L	1	1,0	0,4	0,1	М +
AD590M	1	0,5	0,3	0,1	М +
AD592	1	0,5–2,5	0,15–0,35	0,1	І +
TMP-01	(5)	1,2–6	0,4–1,0	?	І, М+

Таблица 3.5

Тип	Кол-во бит	Чувствительность, °С	Погрешность, °С	Темп. диапазон
AD7314	10	0,25	2	М
AD7414/15	10	0,25	2	М
ADT7301	12		0,5	М+

составляет 2,5 В. Чувствительность датчика составляет 5 мВ/К. Следовательно, дрейф номинального напряжения составит 37,5 мкВ, что соответствует 0,0075°К (максимальный – 0,02°К). Эти цифры весьма оптимистичны. Но сопоставление гистерезиса (5мкА/град) о смещения компараторов (от 0,3 до 1,2мВ) с чувствительностью показывает, что погрешность данного датчика лежит в пределах 0,06–0,24°К.

3.4. Датчики ADT7460, ADT7463

Отличительные особенности устройства ***dBCOOL*** (контроллер теплового управления и слежения за напряжениями питания):

- Отслеживание до 5 напряжений питания;
- Слежение и контроль за скоростью до 4 вентиляторов;
- Один встроенный и два внешних температурных датчика;
- Отслеживание до 6 процессорных VID бит;
- Динамический TMIN режим управления, оптимизирующий; акустические шумы;

- Автоматический режим контроля скорости вентилятора системы охлаждения при изменении температуры;
- Отслеживание характеристик процессоров Intel® Pentium™ 4 схемой контроля температуры через (TCC) через вывод THERM;
- 2 проводное и 3 проводное измерение скорости вентиляторов;
- Предельное сравнение всех отслеживаемых величин;
- Удовлетворяет электрическим требованиям спецификации SMBus 2.0 (полностью удовлетворяет требованиям SMBus).

Применение:

- Малошумящие ПК
- Сетевое оборудование
- Оборудование передачи данных.

Функциональная схема приведена на рис. 3.3, рекомендуемая схема включения показана на рис. 3.4.

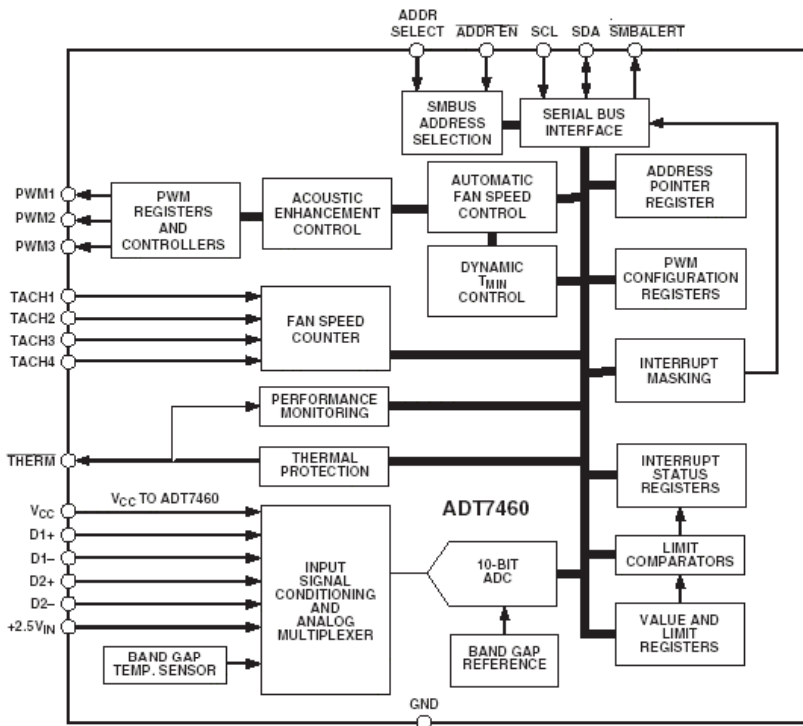


Рис. 3.3. Функциональная схема датчика ADT7460

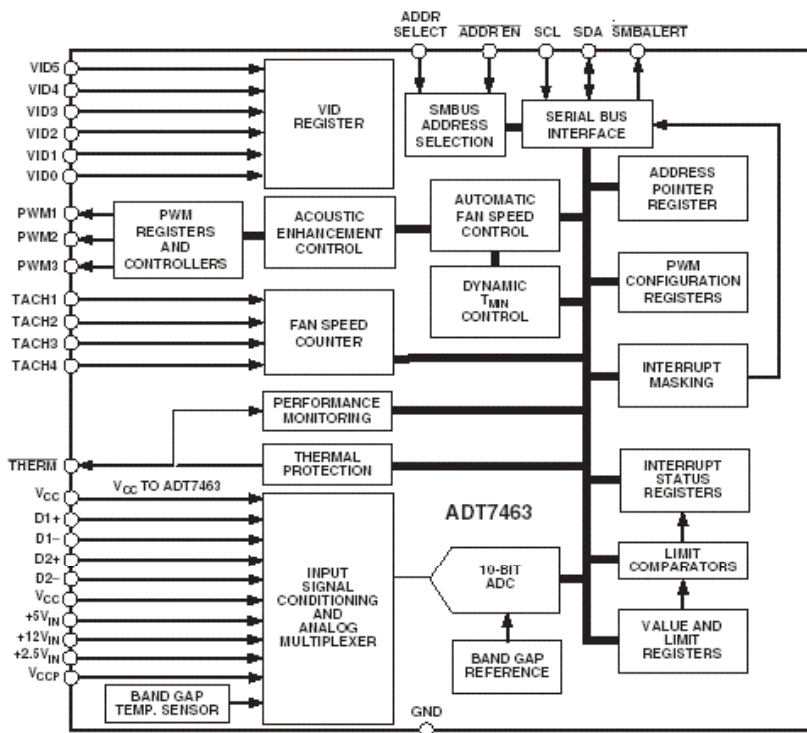


Рис. 3.4. Рекомендуемая схема включения

ADT7460 и ADT7463 являются законченным решением системы управления температурным режимом, ADT7463 также имеет схему контроля напряжений системной платы и центрального процессора. ADT7460/7463 также совместимы со схемой контроля температуры (TCC) процессора Pentium® 4, которая позволяет им контролировать температурный режим процессоров Pentium® 4 без снижения производительности системы. TCC также обнаруживает и корректирует снижение эффективности системы из-за выхода из строя вентилятора. ADT7460/7463 обеспечивают рабочую температурную точку независимо от условий эксплуатации и конфигурации системы. Эти новые ИС также позволяют вести мультizonальный контроль температуры и многоканальный контроль питающих напряжений, давая изготовителям систем контроля скорости вращения вентилятора, возможность

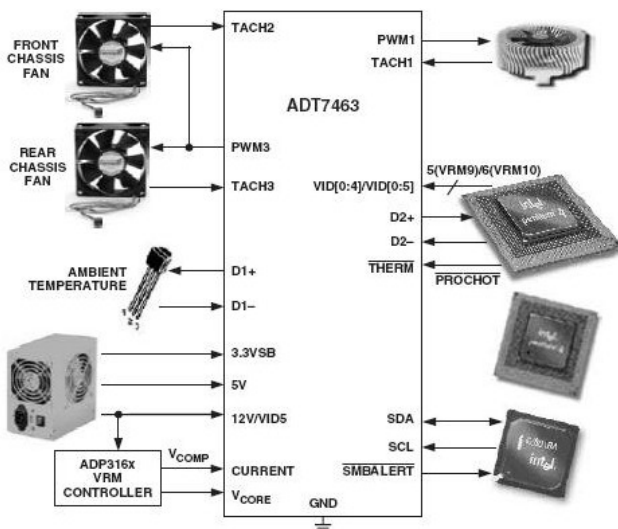


Рис. 3.5. Рекомендуемая схема подключения внешних элементов

контролировать температуру трех различных температурных зон и напряжения питания системного блока питания, чтобы гарантировать работу в указанных пределах.

3.5. Прецизионные источники напряжения и термодатчики

Прецизионный источник опорного напряжения AD780 позволяет задавать опорное напряжение с высокой точностью и измерять температуру. Его электрические параметры приведены в табл. 3.6.

Прецизионный преобразователь AD590 позволяет со средней точностью измерять температуру (ошибка калибровки достаточно велика). Если не требуется очень высокая воспроизводимость абсолютного значения шкалы, то этот датчик привлекает простотой включения и взаимозаменяемостью. Воспроизводимость температурной характеристики достаточно хороша и нормируется производителем. Кратковременная стабильность этой характеристики, вероятно, на один - два порядка выше, поэтому данный датчик можно применять в системах, требующих воспроизводимость измерения (стабилизации) с погрешно-

стью на уровне: гарантированно – менее $+0,1^{\circ}\text{C}$, типовое значение – предположительно меньше. Параметры датчика приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.6

выходное напряжение в режиме 1	$2,5 \pm 0,005\text{В}$
выходное напряжение в режиме 2	$3,0 \pm 0,005\text{В}$
температурный дрейф выходного напряжения в диапазоне $-40^{\circ}\text{C} < T_A < +85^{\circ}\text{C}$ в диапазоне $-55^{\circ}\text{C} < T_A < +125^{\circ}\text{C}$	$0,0007\%/^{\circ}\text{C}$ $0,0020\%/^{\circ}\text{C}$
выходной шум в полосе от 0,1 Гц до 10 Гц спектральная плотность до 100Гц	4мкВ (p/p) $100\text{нВ/Гц}^{1/2}$
дрейф выходного напряжения за первые 1000 часов за последующие 1000 часов	$\pm 0,002\%$ $\ll \pm 0,002\%$
чувствительность температурного выхода	$1,9\text{ мВ}/^{\circ}\text{C}$
значение напряжения температурного выхода при 25°C	$560 \pm 60\text{мВ}$
выходное сопротивление температурного выхода	3КОм

Таблица 3.7

рабочее напряжение питания	от +4В до +30В
температурный дрейф выходного напряжения в диапазоне $-40^{\circ}\text{C} < T_A < +85^{\circ}\text{C}$ в диапазоне $-55^{\circ}\text{C} < T_A < +125^{\circ}\text{C}$	$0,0007\%/^{\circ}\text{C}$ $0,0020\%/^{\circ}\text{C}$
чувствительность температурного выхода	1 мА/К
ток температурного выхода при $+25^{\circ}\text{C}$	298,2мА
ошибка калибровки	$\pm 0,1^{\circ}\text{C}$
токовый шум (спектральная плотность)	$0,040\text{нА/Гц}^{1/2}$
Влияние источника питания от +4В до +5В	0,5мА/В
то же от +5В до +15В	0,2мА/В
то же от +15В до +30В	0,1мА/В

3.6. Резистивные термометры (термометры сопротивления)

Точность термометра сопротивления как датчика температуры определяется совокупностью его параметров, в том числе соотношением температурной чувствительности и стабильности номинального значения.

Точность полупроводниковых терморезисторов ограничивается изменением номинального значения сопротивления в сравнении с температурным коэффициентом сопротивления (ТКС). Так ТКС отечественных пленочных терморезисторов составляет единицы процентов на градус: $-\alpha_T = 2...5 \text{ \% / } ^\circ\text{C}$ – для ММТ, $-\alpha_T = 4...8,5 \text{ \% / } ^\circ\text{C}$ – для КМТ, изменения номинального значения за 1 месяц (также как за 100 циклов работы) также составляет единицы процентов: за первые 3000 часов прогрева $\Delta R = 2...5 \text{ \%}$, за последующие 10000 часов $\Delta R = 0,5...1 \text{ \%}$; за первые 60 месяцев хранения $\Delta R = 0,5...0,1 \text{ \%}$ $\square R = 0,5...1 \text{ \%}$, за последующие 140 месяцев $\Delta R = 0,5...0,1 \text{ \%}$ [21]. Это означает, что точность измерения лучше, чем $0,1-0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ не достигается никакими схемами на основе этих термисторов, но даже для ее достижения требуется заново калибровать хранившийся более пяти лет терморезистор, и лишь после этого использовать в схеме.

Датчик температуры на основе термопары требует измерения температуры второго спая, поэтому наряду с тем, что следует измерять разность напряжений этих термопар, и необходим еще и дополнительный датчик температуры второго спая. Применение термопары целесообразно только при высоких температурах (более $150 \text{ }^\circ\text{C}$), когда нельзя воспользоваться иным типом датчика.

Самые точные преобразователи температуры изготавливаются на основе проволочных терморезисторов, которые позволяют измерять температуру с погрешностью около $0,001 \text{ }^\circ\text{C}$ [22]. Сопротивление платиновых терморезисторов в диапазоне температур от 0 до $+650 \text{ }^\circ\text{C}$ выражается соотношением:

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2),$$

где R_0 – сопротивление при $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$; t – температура, в градусах Цельсия. Для платиновой проволоки, применяемой в промышленных термометрах сопротивления,

$$A = 3,96847 \cdot 10^{-3} \cdot 1 / ^\circ\text{C}; \quad B = -5,847 \cdot 10^{-7} \cdot 1 / ^\circ\text{C}^2;$$

В интервале от 0 до -200°C зависимость сопротивления платины от температуры имеет вид:

$$R_t = R_0 \left(1 + At + Bt^2 + C(t - 100)^3 \right),$$

где $C = -4,22 \cdot 10^{-12} \cdot 1 / ^{\circ}\text{C}^3$.

При расчете сопротивления медных проводников в диапазоне от -50 до $+180^{\circ}\text{C}$ можно пользоваться формулой

$$R_t = R_0 (1 + At),$$

где $A = 4,26 \cdot 10^{-3} \cdot 1 / ^{\circ}\text{C}$.

Погрешности, возникающие при измерении температуры термометрами сопротивления, вызываются нестабильностью во времени начального сопротивления R_0 и его $ТКС$ (коэффициент A), изменением сопротивления линии, соединяющей термометр с измерительным прибором, прогревом термометра измерительным током.

Точность измерительной схемы также определяет погрешность измерения температуры. Измерение значения сопротивления в схеме сбалансированного моста позволяет ослабить влияние стабильности питающего напряжения. Для устранения влияния проводов в мостовой схеме применяют трехпроводную и четырехпроводную схемы. В четырехпроводной схеме два провода от датчика служат для соединения его с остальными элементами моста, а два других – для соединения концов датчика со входами инструментального усилителя. В этом случае ток двум последним проводникам пренебрежимо мал (из-за высокого входного сопротивления ИУ), поэтому падение напряжения на первых двух проводниках не влияет на результат измерения.

Альтернатива – питание термометра стабильным током и сравнение падения напряжения на нем с эталонным напряжением. В этом случае упрощается задача управления (в том числе цифрового) температурой, но высокие требования предъявляются к источнику тока, источнику эталонного напряжения и инструментальному усилителю.

Протекающий через термометр ток должен быть достаточно мал, чтобы уменьшить рассеиваемую на нем мощность. При этом падение напряжения на термометре также будет малым, измерение приращения этого напряжения требует применения инструментального усилителя с малым дрейфом. Так, если через медный датчик с величиной сопротивления $R_0 = 100$ Ом протекает ток $I_{rt} = 1$ мА, то изменение температуры на $0,001^{\circ}\text{C}$ вызовет изменение падения напряжения на нем на ве-

личину 0,426 мкВ. Измерение такого приращения следует осуществлять с помощью сверхпрецизионного ОУ (например – OP177FN, имеющего температурный дрейф входного напряжения на уровне 0,03 мкВ/°С). При этом нестабильность тока на уровне $\Delta I = 10 \text{ нА}$ (т. е. $\delta I = 10^{-5}$) вызовет приращение напряжения $\Delta U = 1 \text{ мкВ}$, что породит погрешность измерения температуры $\Delta t = 0,0023 \text{ °С}$. Источник тока с такой стабильностью следует отнести к классу прецизионных.

В случае применения специальных полупроводниковых датчиков температуры сложной схемы для их питания не требуется.

Узел сравнения может быть совмещен с измерительной схемой (как в мостовой схеме) или выполнен в виде аппаратной или программной части. Если падение напряжения на датчике сравнивается с опорным напряжением, то последнее следует формировать также с точностью 5–6 порядков. В случае, если один источник опорного напряжения используется для формирования тока через датчик и для измерения падения напряжения на нем и величина напряжения источника линейно входит в выражение тока и в предписываемое значение, то требования к стабильности опорного источника снижаются. Такая ситуация обеспечивается при измерении напряжения на датчике с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с внешней опорой (если АЦП организовано по типу поразрядного уравнивания или на основе $\Sigma\Delta$ -модуляции).

Сопоставление истинного значения температуры с предписанной величиной может быть выполнено и в цифровом виде как вычитание соответствующих кодов.

В случае включения резистивного датчика в мостовую схему последняя сочетает в себе функции схемы сравнения с предписанным значением, роль уставки температуры выполняет регулируемое опорное сопротивление во втором плече моста. Достоинством такого решения является пониженная зависимость точности поддержания рабочей точки от величины питающего мост напряжения.

Недостатки мостовой схемы:

1. Необходимость пространственного совмещения термозадающего резистора с объектом. В противном случае существенную роль в точности измерения играют подводящие провода. Частично этот недостаток преодолевается применением четырехпроводной схемы, позволяющей вынести датчик на расстояние нескольких метров без существенного ухудшения точности.

2. Невысокая воспроизводимость результата. Точка термостатирования задается положением движка потенциометра. Это положение

меняется механическим способом, что ограничивает плавность регулировки и делает невозможным прецизионное сканирование и возврат в исходное положение, кроме того рабочая точка может смещаться при микроперемещениях движка вследствие механических вибраций. Этот недостаток может быть преодолен применением потенциометров немеханического типа (в этом случае вся схема измерения температуры может быть пересмотрена и в результате возникают иные схемотехнические решения).

3. Ограниченный диапазон регулирования. Ограничение состоит прежде всего в том, что мостовая схема эффективна по сравнению с иными схемами при приблизительном равенстве сопротивлений всех четырех плеч моста.

4. Отсутствие сведений об истинном значении температуры (сигнал с моста пропорционален разности между предписываемой и истинной температурой).

5. Сложность конструкции – опорный резистор должен быть доступен для управления, измерительный – у объекта, поэтому элементы моста разнесены в пространстве.

На рис. 3.6 показана трехпроводная мостовая схема для измерения приращения сопротивления терморезистора R_4 . При равенстве этого сопротивления предписанному значению, устанавливаемому потенциометром R_3 , выходной сигнал моста равен нулю. Выходное напряжение не линейно зависит от приращения сопротивления терморезистора.

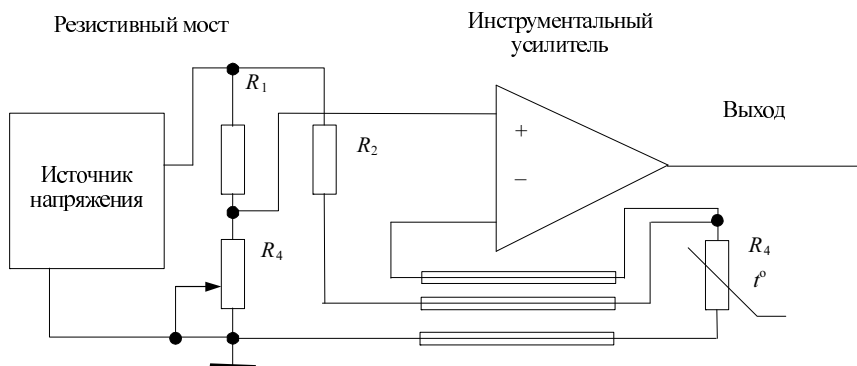


Рис. 3.6. Мостовая схема для измерения приращения сопротивления терморезистора R_4 по отношению к предписанному значению R_3

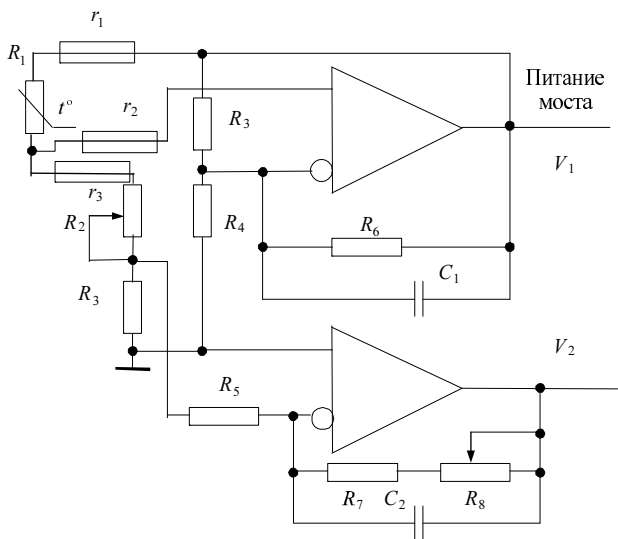


Рис. 3.7. Термометр на основе моста со стабилизацией тока терморезистора

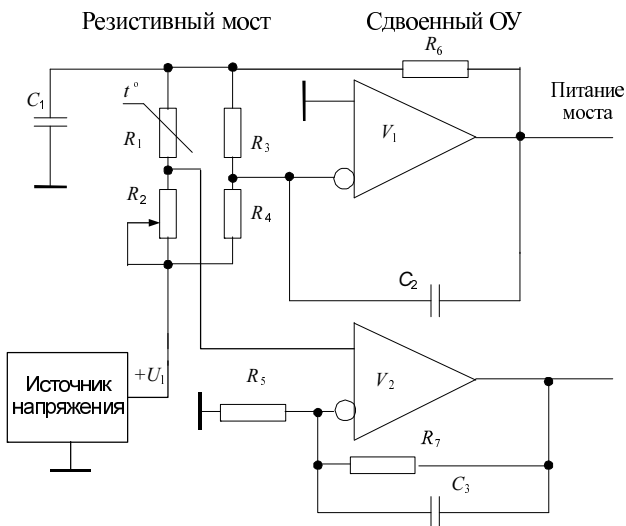


Рис. 3.8. Термометр на основе моста с двухполярным питанием

На рис. 3.7 показана схема термометра на основе моста со стабилизацией тока терморезистора на сдвоенном ОУ [24]. В этой схеме обеспечивается линеаризация зависимости выходного напряжения от приращения сопротивления за счет поддержания фиксированного тока через терморезистор. Здесь применена трехпроводная схема, позволяющая разделить цепи соединения резистора R_1 с резистором R_2 (провод r_3) и с усилителем (провод r_2).

Если разместить термистор и лазер в непосредственной близости от нагревателя, уменьшив тем самым тепловые задержки, то стабильность на уровне 1мК можно обеспечить при помощи довольно простой схемы с мостовым измерителем, показанным на рис. 3.8.

3.7. Термопары и их применение

Термопары широко применяют для измерения температуры различных объектов, а также в автоматизированных системах управления и контроля. Измерение температур с помощью термопар получило широкое распространение из-за надежной конструкции датчика, возможности работать в широком диапазоне температур и дешевизны. Широкому применению термопары обязаны в первую очередь своей простоте, удобству монтажа, возможности измерения локальной температуры. Они гораздо более линейны, чем многие другие датчики, а их нелинейность на сегодняшний день хорошо изучена и описана в специальной литературе. К числу достоинств термопар относятся также малая инерционность, возможность измерения малых разностей температур. Термопары незаменимы при измерении высоких температур (вплоть до 2200 °С) в агрессивных средах. Термопары могут обеспечивать высокую точность измерения температуры на уровне $\pm 0,01$ °С. Они вырабатывают на выходе термоЭДС в диапазоне от микровольт до милливольт, однако требуют стабильного усиления для последующей обработки.

3.8. Прецизионный АЦП для преобразования сигналов датчиков

Прецизионный АЦП напряжения в код AD7714 позволяет измерять напряжение с разрядностью согласно табл. 3.8, поэтому он может быть рекомендован для преобразования сигналов самых разнообразных датчиков.

Таблица 3.8

Полоса частот, в которой реализуется точность операции АЦП	
24 разрядов	< 60Гц
22 разряда	= 100Гц
18 разрядов	= 250 Гц
15 разрядов	= 500 Гц
12 разрядов	= 1кГц
Интегральная нелинейность в полосе < 60Гц	+ 0,0015%

АЦП содержит три коммутируемых полных дифференциальных канала на входе, могут быть организованы пять псевдо- дифференциальных канала, усиление входного масштабного усилителя программно управляется в диапазоне от 1 до 128, выпускаются две модификации, питающиеся от напряжения $3B$ (AD7714-3) и от $5B$ (AD7714-5).

Микросхема может быть вынесена на значительное расстояние (единицы метров) от остальной электронной части системы, поскольку связь с ней может осуществляться по трехпроводной линии как с устройством с последовательным интерфейсом. Это очень важно для получения высоких точностей измерения, поскольку микросхема АЦП может быть помещена в непосредственной близости к источнику сигнала. Точность 24 разряда при опорном напряжении $3B$ соответствует чувствительности $\approx 0,18$ мкВ. Эта величина значительно меньше смещения, которое может образоваться на соединительных проводах, если датчик сигнала удален от АЦП.

4. ДАТЧИКИ УСКОРЕНИЯ, ВИБРАЦИИ И НАКЛОНА (АКСЕЛЕРОМЕТРЫ)

4.1. Датчики компании Analog Devices

Компания Analog Devices является мировым лидером в MEMS-технологии, которая позволяет создавать перспективные и недорогие датчики ускорения и угловой скорости вращения (гироскопы) для применения в таких областях, как, например, автомобилестроение, авионика, геофизика и робототехника.

Analog Devices выпускает большое количество различных модификаций акселерометров – с одной и двумя осями чувствительности, различным уровнем (от 1,5 до 100 g) измеряемого ускорения и с разными типами выходного сигнала (аналоговым – напряжение и импульсным – ШИМ). При этом микросхемы отличаются вариантами исполнения корпуса и рабочей температурой. Акселерометры могут измерять как динамическое ускорение (вибрацию), так и статическое ускорение (гравитацию). Они содержат подвижные микроскопические кремниевые пластины и прецизионные каскады обработки сигналов, что позволило изготовить в виде одной ИМС акселерометра с минимальным потреблением (200 мА на ось при 3 В питания) и высокой точностью. При этом микросхемы имеют чувствительность от 2 *mg* при уровне шума порядка 300 мкг/ $\sqrt{\text{Гц}}$ и возможность фильтрации сигналов с низкими уровнями, лежащих в полосе частот до 60 Гц, что дает возможность использовать акселерометры в качестве достаточно точных датчиков угла наклона.

Самый новый на сегодня акселерометр ADXL311 имеет размеры порядка 5 × 5 × 2 мм в корпусе LCC и доступен в России по цене 6,5 \$.

Информация о датчиках этой компании может быть легко найдена на официальном сайте компании.

4.2. Датчики угловой скорости вращения (гироскопы)

Некоторые сведения о датчиках угловой скорости даны в Табл. 3.9 и 3.10. Принцип действия MEMS-гироскопов основан на измерении параметров колебаний чувствительных элементов, вызываемых кориолисовыми силами инерции. Внутри гироскопа расположены два микромеханических узла из поликристаллического кремния, снабженные специальными возбуждающими рамками, которые с помощью электрического сигнала приводятся в резонанс. Колебания микромеханических элементов имеют достаточно высокую частоту и амплитуду, чтобы при угловом вращении прибора сила Кориолиса, действующая на эти элементы, достигала заметной величины. По краям каждой возбужденной рамки, перпендикулярно направлению колебаний, расположены подвижные зубцы, которые чередуются с неподвижными зубцами, фиксированными на кремниевую подложку. Таким образом, образуется структура, емкость которой меняется в соответствии с величиной силы Кориолиса.

Таблица 3.9

Микросхема	Диапазон измерений, °/с	Оси	Плотность шума, °/с / $\sqrt{\text{Гц}}$	Полоса, Гц	Питание, В	Ток потребления
ADXRS150	±150	Z	0,05	40	4,75...5,25	6,0
ADXRS300	±300	Z	0,05	40	4,75... 5,25	6,0

Таблица 3.10

Название	Описание	Диапазон измерений	Оси	Разрешение	Полоса, кГц	Напряжение питания, В	Потребляемый ток, мА
ADXL103	Одноосевой с аналоговым выходом	±1,5 g	X	2 mg	2	3...6	0,7
ADXL203	Двухосевой с аналоговыми выходами	±1,5 g	X,Y	2 mg	2	3...6	0,7

Окончание табл. 3.10

Название	Описание	Диапазон измерений	Оси	Разрешение	Полоса, кГц	Напряжение питания, В	Потребляемый ток, мА
ADXL311	Двухосевой с аналоговыми выходами	± 2 g	X, Y	5 mg	6	2,7...5	0,4
ADXL202 E	двухосевой ADXL202 в компактном корпусе	± 2 g	X, Y	5 mg	6	2,7...5	0,5
ADXL210 E	двухосевой ADXL210 в компактном корпусе	± 10 g	X, Y	10 mg	6	3...5	0,6
ADXL250	Двухосевой с высоким разрешением	± 50 g	X, Y	10 mg	1	4...5	3,5
ADXL150	Одноосевой с высоким разрешением	± 50 g	X	10 mg	1	4...5	1,8
ADXL190	одноосевой	± 100 g	X	40 mg	400	5	1,8
ADXL202	Двухосевой с цифровым выходом	± 2 g	X, Y	5 mg	6	2,7... 5	0,5
ADXL105	одноосевой, замена для ADXL05	± 5 g	X	2 mg	10	2,7...5	2
ADXL210	Двухосевой с цифровым выходом	± 10 g	X, Y	10 mg	6	2,7...5	0,5

Полученный с емкостного датчика высокочастотный сигнал поступает на каскады усиления и демодуляции, в итоге на выходе микросхемы получаем сигнал напряжения, пропорциональный угловой скорости.

Максимальная детектируемая скорость вращения (т. е. динамический диапазон датчика угловой скорости) составляет у гироскопов ADXRS150 и ADXRS300 соответственно 1507с и 3007с.

Гироскопы и акселерометры, выпускаемые компанией Analog Devices, проходят специальное тестирование и являются высоконадежными датчиками. Они имеют однополярное питание 3...5 В и варианты корпусов от DIP до компактных LCC и BGA. Дополнительно акселерометры имеют внутренний термодатчик для компенсации погрешностей измерения, а гироскопы – целую систему автотестирования, снижающую ошибки измерения угловой скорости. Гироскопы и акселерометры могут быть использованы для повышения точности и надежности систем позиционирования и навигации (GPS), стабилизации подвижных систем автомобилей, самолетов, роботов, антенн и промышленного оборудования, ввода данных в портативные компьютеры (PDA) и во многих других областях.

5. ДРУГИЕ ДАТЧИКИ

Невозможно описать все разнообразие датчиков. При необходимости выбора датчика под конкретную задачу целесообразно осуществить поиск по интернет-ресурсам. Перечень поставляемых датчиков достаточно широк. Среди современных фирм, производящих датчики, следует выделить фирму Honeywell. Разнообразие выпускаемых датчиков достигло чрезвычайных широт, а технические характеристики датчиков зачастую вне конкуренции.

Поиск можно осуществлять как по производителям, так и по поставщикам.

Для примера приведем перечень (возможно, не полный) датчиков, поставляемых фирмой Платан [12]:

- датчики влажности
- датчики газа
- датчики давления
- детекторы потока жидкости
- датчики магнитного поля
- датчики оптические
- датчики положения(расстояния)
- датчики пламени (УФ)
- датчики расхода газа
- датчики температуры
- датчики тока
- датчики угла (энкодеры)
- датчики уровня жидкости
- датчики усилия
- датчики ускорения(акселерометры)
- датчики ультразвуковые
- датчики потенциала
- датчики цвета
- датчики контраста

Для выбора датчика (как и любого элемента электронной компонентной базы) целесообразно использовать понятие «области Парет-

то», то есть такой области, в которой каждый элемент характеризуется лучшим значением хотя бы по одному из многих параметров. Например, целесообразно рассматривать датчики, которые характеризуются либо наименьшей погрешностью, либо наибольшим быстродействием, либо наименьшими габаритами, меньшей стоимостью и так далее. В эту область могут попасть и такие датчики, которые не обладают ни одной из характеристик на уровне рекордного значения, но по совокупности характеристик все же не могут быть заменены другими датчиками.

Например, пусть один датчик характеризуется погрешностью 0,1 % при времени преобразования 10 сек., другой датчик – погрешностью 2 % при времени преобразования 0,1 сек, третий датчик – погрешностью 0,3 % при времени преобразования 2 сек. Третий датчик ни по одному из параметров не превосходит первый или второй, но по совокупности параметров может оказаться лучшим, поскольку его быстродействие лучше, чем у первого датчика, а погрешность меньше, чем у второго.

Вопросы для самоконтроля

1. Как вы понимаете термин «стабильность характеристики» датчика? Как может это свойство повлиять на точность датчика?
2. Опишите общие особенности температурной характеристики датчиков резистивных температуры.
3. Необходимо ли изучать все параметры всех доступных датчиков для выбора датчика с целью решения определенной задачи?
4. Какие фирмы – производители датчиков вам известны?
5. Как вы понимаете термин «область Парето»?

ЛИТЕРАТУРА

1. *Фрайден Дж.* Современные датчики: справочник. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
2. *Импортные* электронные компоненты. Дельта электроника Каталог. – М., 2005. – 464 с. www.deltel.ru
3. *Платан.* Электронные компоненты. Каталог. – М., 2005. www.platan.ru
4. *Шефтель И.Т.* Терморезисторы. Главная редакция физико-математической литературы изд-ва “Наука”, 1973.
5. *Справочник* по средствам автоматики / Под ред. В.Э. Нize и И.В. Антика. – М.: Энергоиздат, 1983, – С. 87.
6. *Analog Devices, Inc.*, 1994 – Design-in Reference Manual: Data converters, Amplifiers, Special linear products, Support Components.
7. *Хоменков Н., Зверев А.* Радио. – 1985. – № 1. – С. 47.
8. *Better reliability via system tests.* Electron. Eng. Times 40–41, Aug. 19, 1991.
9. CIPM, BIPM Proc.–Verb. Corn. Int. Poids et Mesures 49, pp. 8–9, No. 26, 1981 (in French).
10. ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements. International Organization for Standardization, Geneva, 1993.
11. *Taylor B.N. and Kuyatt C.E.* Guidelines for Evaluation and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results. NIST Technical Note 1297, Gaithersburg, 1994.
12. Сайт поставщика (фирма Платан). Интернет-ресурс <http://www.platan.ru/cgi-bin/qweryv.pl/0w5547.html>
13. Сайт поставщика. Импортные электронные компоненты. Интернет-ресурс. http://www.deltel.ru/docs/t1_18_1.html

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ДАТЧИКАХ	5
1.1. Классификация датчиков.....	5
1.2. Датчик, как преобразователь энергии	7
1.3. Приоритетная классификация датчиков с позиции пользователя	11
Вопросы для самоконтроля	12
2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ	13
2.1. Передаточная функция.....	13
2.2. Диапазон измеряемых значений	14
2.3. Точность датчиков.....	15
2.4. Преобразовательная характеристика.....	17
2.5. Диапазон выходных значений.....	19
2.6. Калибровка.....	20
2.7. Ошибка калибровки	22
2.8. Гистерезис	23
2.9. Нелинейность.....	23
2.10. Насыщение	25
2.11. Воспроизводимость.....	26
2.12. Мертвая зона.....	26
2.13. Разрешающая способность	27
2.14. Специальные характеристики	28
2.15. Выходной импеданс	28

2.16. Сигнал возбуждения.....	29
2.17. Динамические характеристики	29
2.18. Факторы окружающей среды	34
2.19. Надежность	37
2.20. Характеристики датчиков, диктуемые условиями их применения	40
2.21. Статистическая оценка	41
Вопросы для самоконтроля	43
3. ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ	45
3.1. Датчики температуры фирмы Philips	45
3.2 Интегральные цифровые термометры фирм Philips, Texas Instruments и Maxim	48
3.3. Температурные датчики фирмы Analog Devices	50
3.4. Датчики ADT7460, ADT7463	51
3.5. Прецизионные источники напряжения и термодатчики	54
3.6. Резистивные термометры (термометры сопротивления).....	56
3.7. Термопары и их применение	61
3.8. Прецизионный АЦП для преобразования сигналов датчиков	61
4. ДАТЧИКИ УСКОРЕНИЯ, ВИБРАЦИИ И НАКЛОНА (АКСЕЛЕРОМЕТРЫ)	63
4.1. Датчики компании Analog Devices	63
4.2. Датчики угловой скорости вращения (гироскопы)	64
5. ДРУГИЕ ДАТЧИКИ.....	67
Вопросы для самоконтроля	68
Литература	69

Жмудь Вадим Аркадьевич

**ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ**

Учебное пособие

В авторской редакции

Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*
Компьютерная верстка *Л.А. Веселовская*

Подписано в печать 20.12.2012. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 50 экз.
Уч.-изд. л. 4,18. Печ. л. 4,5. Изд. № 302. Заказ № 95. Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20