

Виктор Жданкин

Ультразвуковые датчики для систем управления

ВВЕДЕНИЕ

Датчики информируют о состоянии внешней среды посредством взаимодействия с ней и преобразования реакции на это взаимодействие в измерительные сигналы. Существует множество явлений и эффектов, видов преобразования сигналов и параметров, которые можно использовать для создания датчиков.

При классификации датчиков в качестве основного критерия используется принцип их действия, который, в свою очередь, базируется на определённых физических или химических явлениях и свойствах.

Так, основным принципом действия акустических систем является определение параметров звуковых (ультразвуковых и т.п.) колебаний. Ультразвуковые колебания (УЗК) создают в воздухе, являющемся упругой средой, движущиеся волны давления с диапазоном частот свыше 20 кГц; в иных средах ультразвуковые волны распространяются с другими частотами. Способность УЗК распростра-

няться в различных средах используется в системах неразрушающего контроля, эхолотах, уровнемерах, ультразвуковых медицинских диагностических установках, датчиках приближения систем автоматизации производственных процессов и т.д.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ

Звуковые колебания в отличие от электромагнитных могут распространяться только в какой-либо упругой среде.

В общем случае скорость распространения звука зависит от изменений плотности упругой среды (ρ) в

пространстве и времени, давления (P) и температуры среды, а также от локальных изменений скорости отдельных частиц упругой среды. Скорость распространения ультразвуковых волн в газовой среде (C) определяется следующим выражением:

$$C = (k \times P / \rho)^{1/2} = \lambda \times f,$$

где P обозначает давление газовой среды;

ρ — плотность упругой среды;

λ и f — соответственно длина волны и частота ультразвуковых колебаний;

k — адиабатический коэффициент для газов.

Для воздуха адиабатический коэффициент равен 1,4, а плотность имеет значение 1,29 кг/м³ при давлении 1013 гПа.

Так как плотность воздуха уменьшается с увеличением температуры, то и скорость распространения звука в воздухе (C_B) является зависимым от температуры параметром. Для воздуха эта



Ультразвуковые датчики фирмы Pepperl+Fuchs

зависимость может быть представлена в следующем виде:

$$C_B = c_0 \times (1 + T/273)^{1/2},$$

где $c_0 = 331,6$ м/с (скорость распространения звука в воздухе при $T = 0^\circ\text{C}$), а T — текущее значение температуры воздуха, представленное в градусах Цельсия.

Относительное изменение скорости распространения звука, как следует из этой формулы, составляет примерно 0,17% на один градус. В табл. 1 представлена зависимость скорости распространения звука в воздухе от температуры.

Скорость распространения звука в воздушной среде существенно зависит и от давления воздуха: с ростом давления она увеличивается, а максимальное значение относительного изменения скорости звука во всём диапазоне колебания атмосферного давления на уровне моря составляет примерно 5%.

На рис. 1 представлена зависимость скорости звука от температуры и давления воздуха.

Кроме того, скорость звука зависит от состава воздуха, например от процентного содержания CO_2 в воздухе, и относи-



Ультразвуковые датчики широко используются в промышленности

Таблица 1. Зависимость скорости распространения звука в воздухе от температуры

$T, ^\circ\text{C}$	-20	0	20	40	60	80
$C_B, \text{м/с}$	319,3	331,6	343,8	355,3	366,5	377,5

тельной влажности. Влияние относительной влажности является меньшим, чем влияние температуры или давления, и вносит максимальное дополнительное изменение скорости звука (сравниваются скорости в сухом и влажном насыщенном воздухе) около 2% [1].

ФОРМИРОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

В составе ультразвуковых датчиков в большинстве случаев используются пьезоэлектрические керамические преобразователи, которые позволяют получать УЗК высокой частоты, обеспечивая тем самым лучшую направленность распространения ультразвуковых волн. Кроме пьезоэлектрического эффекта, для получения УЗК широко используется и электростатический метод, реализуемый электростатическими преобразователями.

Пьезоэлектрические кристаллы имеют свойство изменять размеры (деформироваться) при воздействии на определённые поверхности кристалла электрического напряжения — таким образом электрическая энергия может быть преобразована в механическую. И наоборот, когда давление прикладывается к внешней поверхности кристалла, образуется заряд, который может быть преобразован в напряжение.

В качестве материалов для пьезоэлектрических кристаллов обычно используются титанат свинца (PbTiO_3) и цирконат свинца (PbZrO_3).

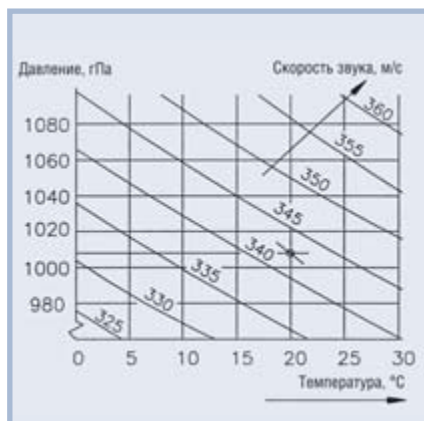


Рис. 1. Зависимость скорости звука от температуры и давления воздуха

Пьезокерамику получают путём спекания пьезоэлектрических микрокристаллов с присадками (связующими веществами). Так как после спекания диполи микрокристаллов располагаются произвольным образом, то полученная керамика поляризуется посредством приложения высокого напряжения при высокой температуре. Благодаря этому вдоль оси поляризации создаётся максимальное растяжение материала. Для упомянутых материалов при воздействии напряжения в несколько сотен вольт оно составляет $d/l = 10^{-4}$.

Очень важным при формировании УЗК в воздухе является корректная реализация перехода между ультразвуковым генератором и окружающей воздушной средой: для получения эффективного излучения должна быть создана большая амплитуда колебаний, а для этого необходим «механизм» трансформации, который преобразовал бы небольшую амплитуду изменения параметров конденсатора (электростатический метод) или пьезоэлектрического элемента (ПКЭ) в большую амплитуду распространяющихся в воздушной среде колебаний.

Далее кратко описываются наиболее распространённые способы выполнения такой трансформации.

Электростатический ультразвуковой преобразователь

Основными элементами преобразователя являются тонкая металлизированная пластиковая плёнка (фольга) и бороздчатая металлическая пластина, которые вместе образуют конденсатор (рис. 2). В случае подключения к пластине внешнего постоянного напряжения электростатическая сила воздействует на фольгу, фольга и пластина притягиваются друг к другу. Переменное напряжение определённой частоты, которое накладывается на постоянное напряжение, вызывает вибрирование фольги с той же частотой. «Подпорка» постоянным напряжением необходима из-за того, что сила, действующая на фольгу, пропорциональна квадрату приложенного напряжения и при использовании только переменного напряжения потребуется вдвое большее

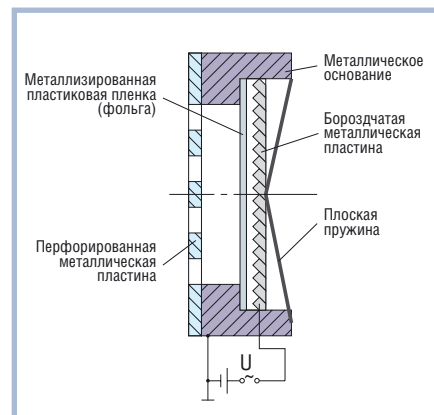


Рис. 2. Схематическое представление электростатического ультразвукового преобразователя

по амплитуде напряжение. Пластина удерживается под постоянным давлением посредством плоской пружины. Возможна настройка частоты УЗК до 500 кГц.

Основные характеристики:

- широкая полоса пропускания;
- малое время затухания и нарастания сигнала;
- относительно низкое акустическое давление;
- открытая конструкция.

Главным недостатком таких преобразователей является потребность в высоком внешнем напряжении.

Преобразователь с изгибаемыми пластинами

Пьезоэлектрический диск приклеен к металлическому диску (рис. 3). При подключении внешнего напряжения диаметр пьезоэлектрического диска изменяется, что создаёт усилие сдвига и вызывает изгиб с определённой амплитудой всей системы из двух дисков.

Основные характеристики:

- высокие показатели электроакустического преобразования;
- относительно низкая частота;
- низкий уровень звуковых сигналов;
- узкая полоса пропускания (резонансная система);
- большое время затухания;
- возможна герметизированная конструкция.

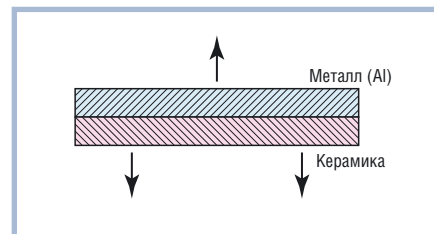


Рис. 3. Схематическое представление преобразователя с изгибаемыми пластинами

Мембранный преобразователь

Упругая мембрана, выполненная, например, из металла, возбуждается с собственным циклом колебаний пьезокерамическим элементом (рис. 4).

Основные характеристики:

- широкая диаграмма направленности излучения;
- относительно низкая частота;
- низкий уровень звуковых сигналов;
- узкая полоса пропускания (резонансная система);
- большое время затухания;
- открытая конструкция (высокое напряжение).

$\lambda/4$ -вибратор (четвертьволновый излучатель)

На пути от пьезокерамического элемента до среды распространения ультразвуковых волн (колебания давления) проходят через материалы с различными акустическими импедансами. Характеристикой эффективности перехода волны из одной среды в другую является коэффициент передачи. Коэффициент передачи между пьезокерамикой и воздухом лежит в области от 10^{-5} до 10^{-4} ; это очень мало, и,

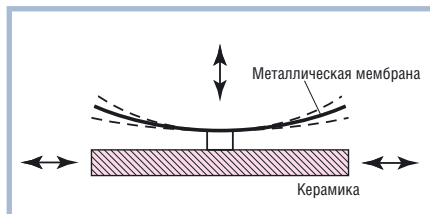


Рис. 4. Схематическое представление мембранного преобразователя

как следствие, никакого излучения не происходит. Коэффициент передачи значительно увеличивается посредством применения разделительного слоя между пьезокерамикой и воздухом. Материалом, использование которого в качестве разделительного слоя обеспечивает наибольший эффект передачи, является композиция пустотелых стеклянных шариков и эпоксидной смолы. Этот материал получил широкое распространение не только благодаря возможности создания на его основе согласующего импеданса, но и из-за стойкости к воздействию факторов окружающей среды, небольшого внутреннего затухания и хороших механических свойств. Толщина разделительного слоя рассчитывается таким образом, чтобы она со-

ставляла ровно четверть длины излучаемой волны ($\lambda/4$). В силу резонансных явлений именно при такой толщине слоя достигается наибольшая амплитуда колебания на поверхности излучателя.

Основные характеристики:

- высокое акустическое давление;
- узкая диаграмма направленности излучения;
- среднее время затухания;
- небольшой диапазон длин волн;
- возможность работы с высокими частотами;
- отсутствие электропроводящих деталей на поверхности.

В номенклатуре изделий фирмы Pepperl+Fuchs в большинстве случаев применяются преобразователи на основе четвертьволнового вибратора.

Форма диаграммы направленности зависит от размеров поверхности излучения, частоты излучаемых колебаний и фазового соотношения сигналов от разных участков поверхности излучателя. Если необходимо получить узконаправленный луч ультразвуковых колебаний, диаметр излучающей поверхности должен быть выбран соизмеримым с длиной волны генерируемых ко-

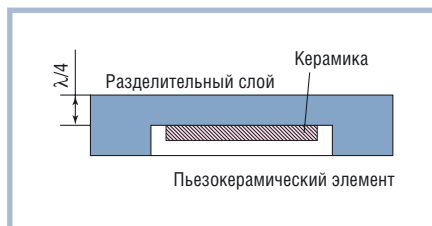


Рис. 5. Схематическое представление излучателя фирмы Pepperl+Fuchs

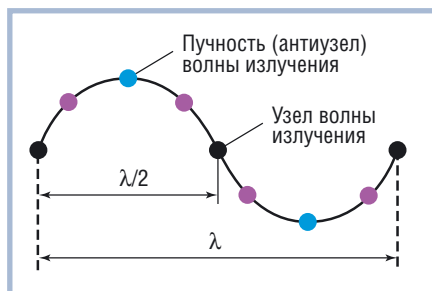


Рис. 6. Соотношение узлов и пучностей волны излучения

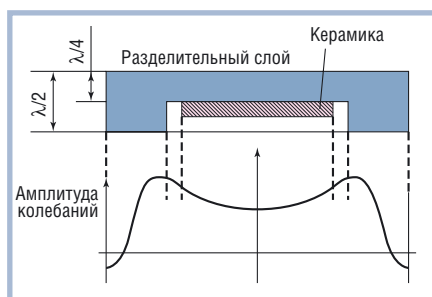


Рис. 7. Распределение амплитуды колебаний для излучателя Pepperl+Fuchs

лебаний. Вместе с тем увеличение собственной частоты излучателя тоже связано с уменьшением его диаметра. Компромисс между стремлениями уменьшить размеры излучателя и сохранить энергетические свойства преобразователя достигается за счёт покрытия пьезокерамического элемента с небольшим диаметром большим по объёму разделительным слоем (рис. 5). В этом случае особое внимание уделяется проблеме обеспечения синфазности излучения на всей поверхности разделительного слоя, так как при его значительных размерах возникают не только полезные поперечные колебания, но и другие колебания (моды), искажающие требуемое фазовое соотношение излучаемых сигналов. Разрешение данной проблемы во многом связано с выбором способа компоновки излучателя и разделительного слоя внутри преобразователя.

В четвертьволновом вибраторе амплитуда колебаний в граничной плоскости между ПКЭ и разделительным слоем значительно меньше амплитуды на поверхности разделительного слоя и

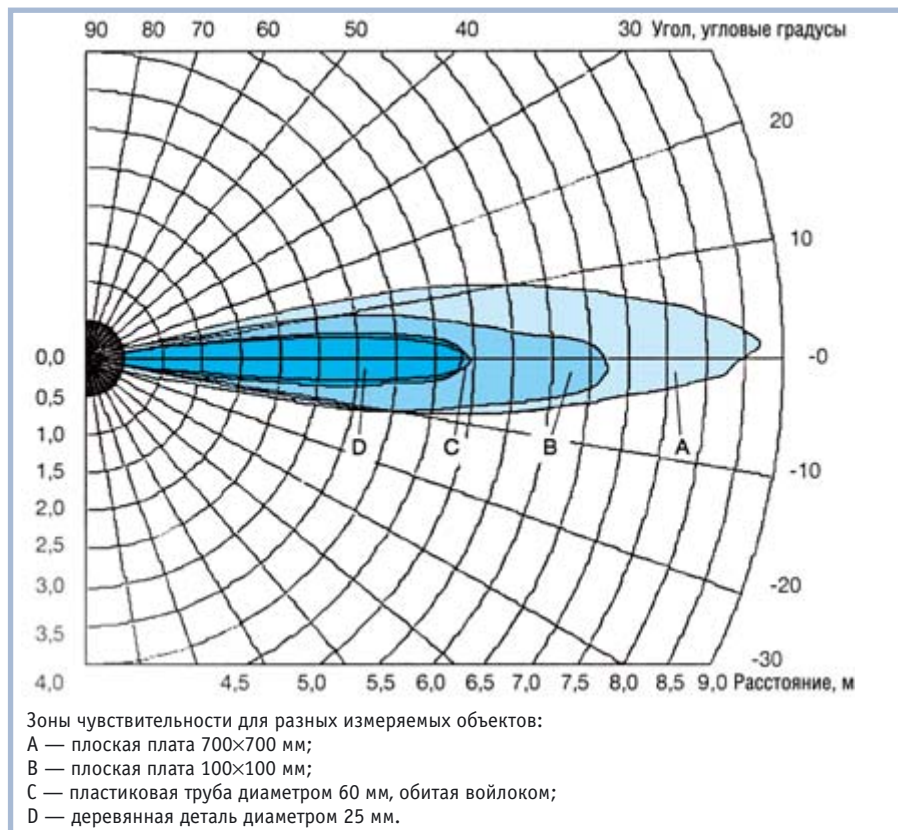


Рис. 8. Пример реальной диаграммы направленности излучения ультразвукового датчика UJ4000-FP-N12

может быть рассмотрена как амплитуда колебаний в узловой плоскости (рис. 6). При компоновке, выбранной фирмой Pepperl+Fuchs (рис. 7), на переднюю и заднюю поверхности излучателя с толщиной разделительного слоя $\lambda/2$ приходятся пучности стоячей волны излучения, а на ПКЭ, расположенный в середине разделительного слоя ($\lambda/4$), — её узловые точки (расстояние между соседними узлами или соседними пучностями всегда равно половине длины волны). Это обеспечивает высокую эффективность работы датчика при низком энергопотреблении, а также приводит к тому, что фазовое соотношение искажается лишь в зоне границы между ПКЭ и разделительным слоем, а следовательно, распространяется только на сигналы с минимальной амплитудой и практически не приводит к искажению суммарного излучаемого сигнала (эпюра на рис. 7).

На рис. 8 приведён пример диаграммы направленности излучения ультразвукового датчика UJ4000-FP-N12 фирмы Pepperl+Fuchs (диаметр излучателя 50 мм, диапазон измерения до 4 м, частота излучателя 90 кГц, время изменения амплитуды от максимального значения до уровня 1/10 максимума примерно 500 мкс) с указанием зон чувствительности, соот-

ветствующих измеряемым объектам с разными отражательными свойствами и размерами; диаграмма построена на основе реальных измеренных данных, нормированных по звуковому давлению при 0°C.

ЭЛЕКТРОННАЯ ЧАСТЬ ДАТЧИКА

Для того чтобы ультразвуковой преобразователь был способен воспринимать входные воздействия и представлять их в виде, приемлемом для дальнейшей обработки, ему необходимо добавить некоторые дополнительные компоненты; только после этого полученное интегрированное устройство можно назвать датчиком.

Основными компонентами электронной части ультразвуковых датчиков фирмы Pepperl+Fuchs являются блоки излучателя и приёмного усилителя (рис. 9).

Блок излучателя

Излучатель включает в себя электронный ключ, генератор колебаний и усилительный выходной каскад, с выхода которого выдаётся напряжение 250 В, требуемое для возбуждения пьезокерамического элемента. Генератор предварительно настраивается на резонансную частоту ультразвукового преобразователя. Резонансная частота за-

висит от типа датчика: она лежит в диапазоне до 70 кГц для преобразователей с зоной срабатывания до 6 м и в диапазоне до 170 кГц для преобразователей с зоной срабатывания 1 м. Электронный ключ включает и выключает генератор в зависимости от длительности импульса запуска, тем самым формируются последовательности импульсов излучения разной длины.

Блок приёмного усилителя

Приёмник состоит из ограничителя, усилителя с регулируемым коэффициентом усиления, селективного усилителя, выходного усилительного каскада и компаратора.

Сигнал, принимаемый от ультразвукового преобразователя, может иметь амплитуду в диапазоне от нескольких микровольт до нескольких вольт. Для обеспечения возможности дальнейшей обработки ограничитель отсекает амплитуды принимаемых сигналов до значений, не превышающих $\pm 0,7$ В; это также защищает усилитель от слишком высокого напряжения. Сигналы, отражённые от фона, подавляются на усилителе с регулируемым коэффициентом усиления. Этот же усилитель совместно со схе-

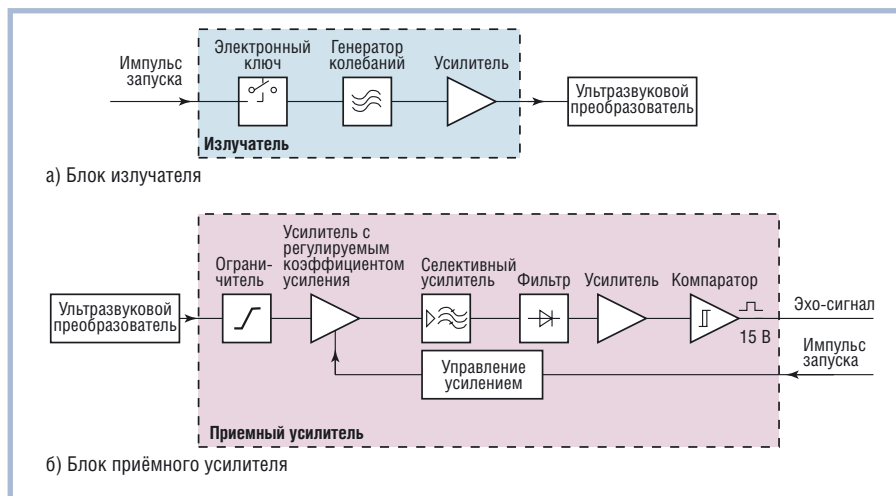


Рис. 9. Блок-схемы излучателя и приёмного усилителя

мой управления усилением препятствует уменьшению амплитуды отражённого сигнала при увеличении расстояния между измеряемым объектом и датчиком.

Назначение селективного усилителя заключается в том, чтобы отфильтровывать случайные (паразитные, побочные) ультразвуковые сигналы и пропускать к дальнейшей обработке только полезный сигнал. Этот сигнал демодулируется, детектируется и только затем полученная огибающая усиливается.

Амплитуда огибающей сравнивается с предварительно установленным порогом на компараторе; в случае когда пороговое напряжение превышено, на выходе возникает импульс, равный по амплитуде напряжению питания, и передаётся для обработки в электронную схему.

Блок обработки и управления

Кроме излучателя и приёмника, современный ультразвуковой датчик должен иметь в своём составе элек-

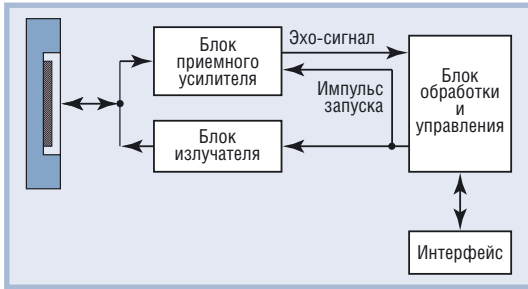


Рис. 10. Блок-схема ультразвукового датчика

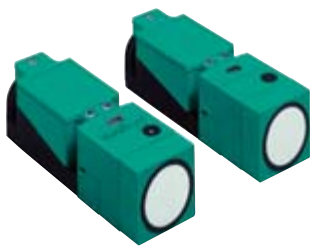
тронную схему обработки сигнала и управления распределением временных интервалов и функционированием выходного каскада датчика (рис. 10). Так как электронная часть датчика должна решать сложные задачи управления, предпочтительнее применять микропроцессорную схему. Дополнительным преимуществом в данном случае является то, что алгоритм обработки может быть не жёстко установленным, а гибким и реализованным в виде программы. Одна и та же микропроцессорная схема может применяться для управления разнообразными выходными каскадами или выполнять обработку сигналов по разным алгоритмам.

Функциями, которые выполняются встроенным контроллером, обычно являются генерирование тактовой частоты, управление длительностью излучаемого импульса, определение времени распространения отражённого сигнала, распознавание сигналов помехового происхождения, управление выходным каскадом и самодиагностика. Кроме того, контроллер может устанавливать связь с центральным компьютером через соответствующий интерфейс.

Конструктивное исполнение

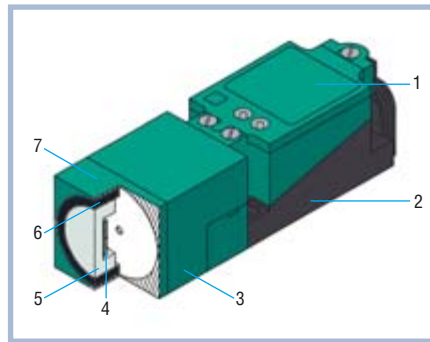
Многие ультразвуковые датчики фирмы Pepperl+Fuchs имеют традиционную для данного типа изделий конструкцию. Исключение составляют датчики в прямоугольном корпусе типа VariKont.

Датчик в прямоугольном корпусе состоит из трёх частей: узла измеритель-



Ультразвуковые датчики UBE6000-U2-SA2 в корпусе типа VariKont

ного преобразователя с аналоговыми каскадами излучателя и приёмника, узла с контроллером и выходным каскадом, основания с терминальным отрезком для подключения электрических входных и выходных сигналов. Часть корпуса, в которой размещён ультразвуковой преобразователь, может быть установлена под разными углами относительно основания корпуса, что позволяет при жёстко зафиксированном основании контролировать различные направления в пространстве. Ультразвуковой преобразователь встроен в корпус датчика и герметизирован пенополиуретаном. Разъёмное соединение между основной частью корпуса, которая вмещает всю электронику, и основанием позволяет осуществлять ремонт или замену узлов датчика без его демонтажа.



- Условные обозначения:
 1 — отсек корпуса для размещения встроенного контроллера и выходного каскада;
 2 — основание корпуса с терминальным отрезком;
 3 — поворачиваемая часть корпуса с излучателем и приёмником;
 4 — узел преобразователя;
 5 — разделительный слой;
 6 — органическая пена;
 7 — пьезокерамический элемент.

Рис. 11. Конструкция ультразвукового датчика в прямоугольном корпусе (UJ2000+U1+N12+P1, Pepperl+Fuchs)

Основные элементы конструкции ультразвукового датчика в прямоугольном корпусе показаны на рис. 11.

Основные принципы работы

Преобразователь посылает пачку ультразвуковых импульсов и формирует напряжение, соответствующее принятому отражённому сигналу. Встроенный контроллер вычисляет расстояние по времени распространения эхо-сигнала и скорости звука. Длительность излучаемого импульса и время затухания колебаний (переходных процессов) ультразвукового преобразователя определяют размер «слепой» зоны, в которой датчик не может обнаружить объект.

Частота ультразвуковых колебаний лежит в диапазоне от 65 до 400 кГц в зависимости от типа датчика; частота повторения пачек импульсов находится между 14 и 140 Гц.

Важнейшей характеристикой ультразвукового датчика является размер зоны обнаружения (рис. 12). Зона ограничена минимальным и максимальным расстояниями обнаружения, значения которых зависят от параметров преобразователя. Максимальное расстояние обнаружения указывается в коде маркировки датчика.

В зависимости от используемых методов различают несколько типов ультразвуковых датчиков, основными из которых являются датчики, осуществляющие измерение времени, затрачиваемого звуком на распространение до измеряемого объекта и обратно (непосредственное обнаружение), и датчики, выполняющие проверку приёма переданного сигнала (ретрорефлективный, или рефлекторный метод).

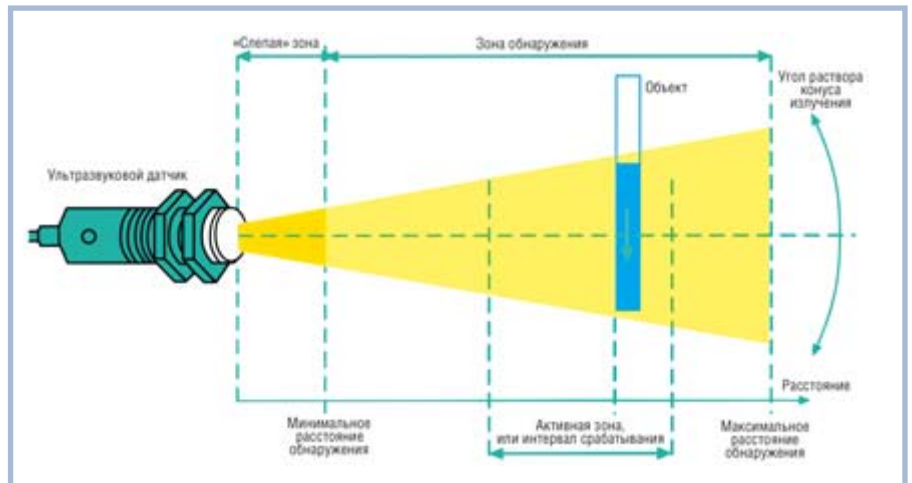


Рис. 12. Зона обнаружения ультразвукового датчика

Непосредственное обнаружение системой с одним преобразователем

В этом случае излучатель и детектор располагаются в одном корпусе, что обеспечивает компактность конструкции датчика.

Недостатком этого метода является относительно большое минимальное расстояние обнаружения: отражённые сигналы от объектов, расположенных очень близко к датчику, поступают раньше окончания спада импульса излучателя и по этой причине не могут быть обработаны.

Основные особенности:

- размеры зоны обнаружения зависят от отражательной способности объекта, то есть от характеристик рассеивания поверхности и угла направленности излучения по отношению к ней (в определённых пределах это влияние может быть компенсировано подстройкой чувствительности датчика);
- соответствующие датчики состоят из одного блока и не требуют сложной установки.

Непосредственное обнаружение системой с двумя отдельными преобразователями

Путем применения двух отдельных преобразователей минимальное расстояние обнаружения может быть существенно уменьшено по сравнению со случаем использования единого приёмопередатчика. Если приёмник акустически разделён с излучателем, то, в принципе, отражённый сигнал может быть принят сразу после излучения, а в реальных условиях это происходит с некоторой задержкой, определяемой переходными процессами в преобразователях.

Оба преобразователя могут располагаться в одном корпусе или устанавливаться раздельно (рис. 13).

Основные особенности:

- обеспечивается возможность непосредственного обнаружения небольших объектов и работы на малых расстояниях до объекта;
- соответствующие датчики нечувствительны к отражениям от объектов за пределами зоны обнаружения (маскирование фона).

Ретрорефлективный метод

Данный метод является наиболее устойчивым к помехам. Контролируется пространство между датчиком и стаци-

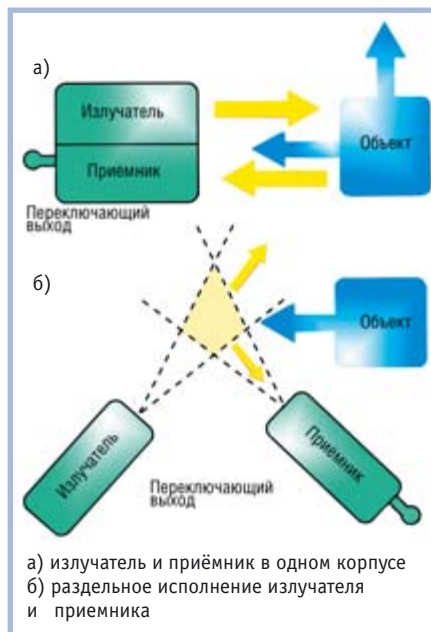


Рис. 13. Принцип непосредственного обнаружения объекта датчиком с раздельными излучателем и приёмником

онарным рефлектором (рис. 14). Приёмник улавливает ультразвуковой сигнал, отражённый от рефлектора. При пересечении луча объектом происходит срабатывание датчика. Почти все датчики фирмы Perrel+Fuchs, работающие по такому методу, обладают функцией регулирования диапазона срабатывания и снабжены двумя выходами и двумя светодиодными индикаторами.

Посредством этого метода также возможно определять объекты из звукопоглощающих материалов.

Метод прерывания луча

Этот метод характеризуется большой дальностью обнаружения, так как в данном случае для определения местоположения объекта ультразвуковая волна должна пройти расстояние между излучателем и приёмником только в одном направлении (рис. 15). Помехоустойчивость этого метода лучше, чем у метода непосредственного обнаружения, потому что обрабатывается излучённый, а не отражённый ультразвуковой импульс.

Однако реализация метода прерывания луча требует более высоких затрат.

Датчики, работающие по прерыванию луча, иногда называют барьерными. Они более предпочтительны для использования внутри помещений по сравнению с датчиками, реализующими метод непосредственного обнаружения.

Сравнение методов

Подробнее остановимся на сравнении ультразвуковых датчиков, работа-

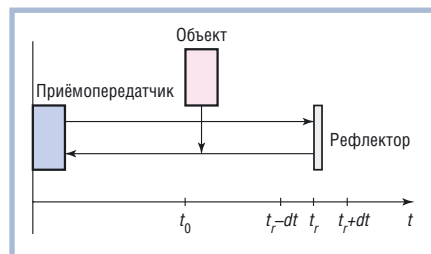


Рис. 14. Принцип обнаружения объекта по ретрорефлективному методу

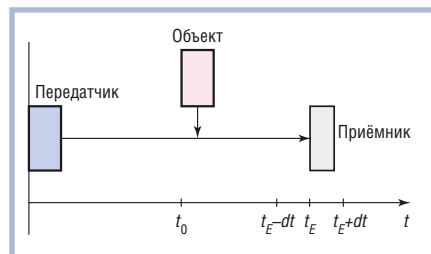


Рис. 15. Принцип обнаружения объекта по методу прерывания луча

ющих на основе ретрорефлективного метода и метода прерывания луча. В обоих случаях датчики оперируют с импульсом запуска определённой длительности, по которому излучатель генерирует пачку импульсов и в детекторе формируется управляющее напряжение.

Ретрорефлективный датчик постоянно контролирует расстояние между ультразвуковым излучателем и рефлектором с фиксированным положением. Электронная схема обработки и управления (встроенный контроллер) измеряет время прохождения сигнала. В случае когда соответствующее измеренному времени расстояние оказывается отличным от фиксированного расстояния до рефлектора, выходной электронный ключ переключается. Из-за неизбежных изменений в воздушной среде скорость звука может колебаться в определённых пределах, поэтому при измерении времени необходимо вводить соответствующую внешним условиям поправку ($t_r \pm dt$), которая затем учитывается при определении расстояний до рефлектора или объекта (рис. 14).

При определении частоты повторения импульсов (f) рассматриваются три возможных случая:

- объект обнаружен;
- объект не обнаружен;
- эхо-сигнал не поступает в детектор.

В первом случае частота следования импульсов равна

$$f = 1/(2 \times t_0),$$

где t_0 — время прохождения ультразвукового импульса от датчика до объекта.

Во втором случае частота следования импульсов меньше, чем в первом случае, и вычисляется по удвоенному времени прохождения ультразвукового импульса от датчика до рефлектора (t_p):

$$f = 1/(2 \times t_p).$$

Третий случай возможен в ситуациях, когда объект обладает свойствами поглощения звука или имеет наклонную поверхность, которая отражает ультразвуковую волну в направлении, отличном от направления на детектор. В этом случае спустя время ($t_r + dt$), которое соответствует максимальному времени прохождения ультразвукового импульса до рефлектора, излучается очередной импульс, как если бы объект отсутствовал в зоне обнаружения датчика:

$$f = 1/(2 \times (t_r + dt)).$$

Одним из недостатков ретрорефлективного метода является то, что ультразвуковая волна должна пройти от дат-

чика до рефлектора (объекта) и обратно, что в два раза увеличивает время отклика по сравнению с системами, основанными на методе прерывания (ослабления) луча ультразвука (барьерные системы). Другим недостатком является то, что из-за высокого уровня затухания волны на двойном отрезке пути данный метод применим только при относительно небольших расстояниях между датчиком и рефлектором.

При реализации метода прерывания луча детектор и излучатель располагаются строго друг против друга. Вследствие вдвое меньшего расстояния, которое проходит ультразвуковой импульс, и существенно меньших потерь на распространение максимальное расстояние обнаружения для данного объекта в 2,5...3 раза больше, чем для ретрорефлективного.

Минимальное расстояние обнаружения для метода прерывания луча зависит от времени реакции преобразователя и связанной с ним электронной части и находится в пределах нескольких сантиметров.

Время прохождения луча измеряется с момента излучения ультразвукового импульса. Электронная схема обработ-

ки и управления анализирует поступающие импульсы только в пределах времени распространения t_E , которое соответствует расстоянию между излучателем и приёмником (рис. 15). Если луч прерывается, то последующие импульсы не регистрируются приёмником и электронная схема переключает выходной каскад датчика, после чего новый цикл измерения инициируется через промежуток времени ($t_E + dt$). Если ультразвуковой луч не прерывается, то новый измерительный цикл начинается через промежуток времени t_E . Так что независимо от того, прерывается луч или нет, частота следования импульсов (F) сохраняется почти постоянной:

$$F = 1/(t_E + dt) \approx 1/t_E.$$

Для того чтобы подавить помехи, электронная схема обработки и управления инициирует задержку переключения дискретного выхода на время, соответствующее нескольким полезным отражённым сигналам. Это повышает помехоустойчивость датчика, но снижает максимальную частоту переключения барьерной системы.

Для дополнительного подавления помех электронная схема обработки изменяет длительность синхронизирующих импульсов в зависимости от рас-

стояния между излучателем и приёмником.

Основные технические данные барьерных ультразвуковых датчиков фирмы Pepperl+Fuchs представлены в таблицах 2, 3, 4, 5, 6.

Например, датчик UBE4000-30GM-SA2-V1 способен функционировать в запылённой атмосфере, надёжно определять наличие тонких прозрачных плёнок и хлопьевидных материалов (стиропор, целлюлоза, мелкозернистые синтетические материалы). Чувствительность датчика регулируется встроенным потенциометром, юстировка контролируется по встроенным светодиодным индикаторам. Для дистанционной регулировки диапазона чувствительности возможно подключение внешнего потенциометра FP100 к излучателю.

Интересным примерами использования метода ослабления ультразвуковых волн является решение на его основе задач выявления сдвоенных листов бумаги, контроля за положением наклеек и мест стыка. Серия устройств UDB-18GM (табл. 7) специально разработана для подобных применений (рис. 16), которые востребованы в различном оборудовании, например:

- в печатных станках выявление сдвоенных листов защищает сложную механику от повреждений, вызванных застреванием второго листа в станке;
- в аппаратах, подсчитывающих этикетки, для проверки факта нанесения клейких плёнок на материал и подсчёта готовых этикеток;
- в оборудовании обработки корреспонденции для проверки полной загрузки открытых конвертов;
- в аппаратах, подсчитывающих квитанции, контрольные талоны, банковские расписки и т. п.;
- в упаковочных машинах для контроля положения стыка при закреплении алюминиевой упаковочной плёнки, а также для определения скорости хода станка;
- в системах сортировки бумаги и т.д.

Ультразвуковые системы на базе UDB-18GM способны обнаруживать металлизированные, глянцевые, прозрачные поверхности и могут применяться в тех случаях, когда ёмкостные и оптические системы достигают пределов своих возможностей. Простая настройка на различные материалы и толщины (TEACH-IN), а также автоматическое регулирование порога переключения при изменении условий окружа-

Таблица 2. Основные технические данные ультразвуковых датчиков серии 18GK с одним дискретным выходом

Рабочие характеристики	
Диапазон обнаружения	0...500 мм
Раздельная установка излучателя и приёмника	15...500 мм
Время отклика	5 мс
Частота переключений	100 Гц
Электрические параметры	
Рабочее напряжение	18...30 В постоянного тока
Эксплуатационные параметры	
Диапазон рабочих температур	0...+60°C
Степень защиты	IP65
Способ подключения	Соединитель штекерный V1 (M12×1), 4 контакта
Выходы	
Код для заказа	UBE500-18GK-SE2-V1 UBE500-18GK-SE0-V1
Дискретный выход, NPN, НО Дискретный выход, PNP, НО (НО — нормально открытый)	

Таблица 3. Основные технические данные ультразвуковых датчиков серии 30GM с двумя комплементарными дискретными выходами

Рабочие характеристики	
Диапазон обнаружения	0...4000 мм
Раздельная установка излучателя и приёмника	500...4000 мм
Время отклика	30...3000 мс (регулируется)
Частота переключения	<15 Гц
Электрические параметры	
Рабочее напряжение	18...30 В постоянного тока
Эксплуатационные параметры	
Диапазон рабочих температур	0...+60°C
Степень защиты	IP65
Способ подключения	Соединитель штекерный V1 (M12×1), 4 контакта
Выходы	
Код для заказа (излучатель и приёмник включены в комплект поставки)	UBE4000-30GM-SA2-V1
Два дискретных выхода, PNP, комплементарные НО/НЗ (НО — нормально открытый, НЗ — нормально замкнутый)	

Таблица 4. Основные технические данные ультразвуковых датчиков с двумя дискретными выходами в корпусе типа VariKont

Рабочие характеристики	
Диапазон обнаружения	0...6000 мм
Частота переключений	<30 Гц
Электрические параметры	
Рабочее напряжение	20...30 В постоянного тока
Эксплуатационные параметры	
Диапазон рабочих температур	-25...+70°C
Степень защиты	IP65
Способ подключения	Клемный отсек; Pg 13,5; сечение < 2,5 мм ²
Выходы	
Код для заказа (излучатель и приёмник включены в комплект поставки)	UBE6000+U2+SA2
Два дискретных выхода, PNP, комплементарные НО/НЗ (НО — нормально открытый, НЗ — нормально замкнутый)	

Таблица 5. Основные технические данные ультразвуковых датчиков серии F64 с диапазоном обнаружения до 500 мм и одним дискретным выходом

Рабочие характеристики		
Диапазон обнаружения	0...500 мм	0...500 мм
Раздельная установка излучателя и приёмника	15...500 мм	15...500 мм
Время отклика	5 мс	5 мс
Частота переключения	120 Гц	120 Гц
Электрические параметры		
Рабочее напряжение	18...30 В постоянного тока	18...30 В постоянного тока
Эксплуатационные параметры		
Диапазон рабочих температур	0...+60°C	0...+60°C
Степень защиты	IP54	IP54
Способ подключения	Кабель 2 м; для излучателя: сечение 2×0,34 мм ² ; для приёмника: сечение 3×0,34 мм ²	Соединитель штекерный V3 (M8×1), 3 контакта
Выходы		
Один дискретный выход, PNP, HO	UBE500-F64-SE2	UBE500-F64-SE2-V3
Один дискретный выход, NPN, HO (HO — нормально открытый)	UBE500-F64-SE0	UBE500-F64-SE0-V3



Датчики серии 30GM

Ультразвуковая система на базе устройства серии UDB-18GM

Таблица 6. Основные технические данные ультразвуковых датчиков серии F64 с диапазоном обнаружения до 1500 мм и одним дискретным выходом

Рабочие характеристики		
Диапазон обнаружения	0...1500 мм	0...1500 мм
Раздельная установка излучателя и приёмника	20...1500 мм	20...1500 мм
Время отклика	Около 4 мс	Около 4 мс
Частота переключений	120 Гц	120 Гц
Электрические параметры		
Рабочее напряжение	18...30 В постоянного тока	18...30 В постоянного тока
Эксплуатационные параметры		
Диапазон рабочих температур	0...+60°C	0...+60°C
Степень защиты	IP54	IP54
Способ подключения	Кабель 2 м; для излучателя: сечение 2×0,34 мм ² ; для приёмника: сечение 3×0,34 мм ²	Соединитель штекерный V3 (M8×1), 3 контакта
Выходы		
Один дискретный выход, PNP, HO	UBE1500-F64-SE2	UBE1500-F64-SE2-V3
Один дискретный выход, NPN, HO (HO — нормально открытый)	UBE1500-F64-SE0	UBE1500-F64-SE0-V3

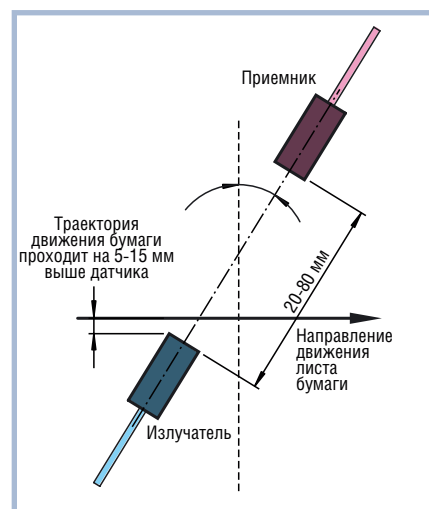


Рис. 16. Схема установки излучателя и приёмника системы на базе устройства UDB-18GM35-3E2 при выявлении сдвоенных листов бумаги

Таблица 7. Основные технические данные устройств серии UDB-18GM

Рабочие характеристики	
Поверхностная плотность контролируемой бумаги	30...1200 г/м ²
Время отклика	1 или 5 мс
Электрические параметры	
Номинальное напряжение питания	20...30 В постоянного тока
Эксплуатационные характеристики	
Диапазон рабочих температур	0...+60°C
Степень защиты	IP65
Тип подключения	Соединитель M12
Дискретные выходы	3 выхода типа PNP (нормально открытые)
Сфера применения	
Выявление сдвоенных листов бумаги	UDB-18GM35-3E2
Контроль положения наклеек	UDBL-18GM35-3E2
Определение положения стыков и соединений	UDBK-18GM35-3E2

ющей среды упрощают подготовку UDB-18GM к эксплуатации и расширяют круг возможных применений.

В ближайших номерах журнала «СТА» планируется, опираясь на описанные в данной статье физические принципы работы и реализуемые методы, продолжить рассказ об ультразвуковых датчиках для систем управления технологическими процессами. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Handbook for the Training Pack SENSORIK SPI. — Mannheim: Pepperl+Fuchs Kolleg GmbH, 1995.

**В.К. Жданкин — сотрудник фирмы ПРОСОФТ
Телефон: (095) 234-0636
E-mail: victor@prosoft.ru**