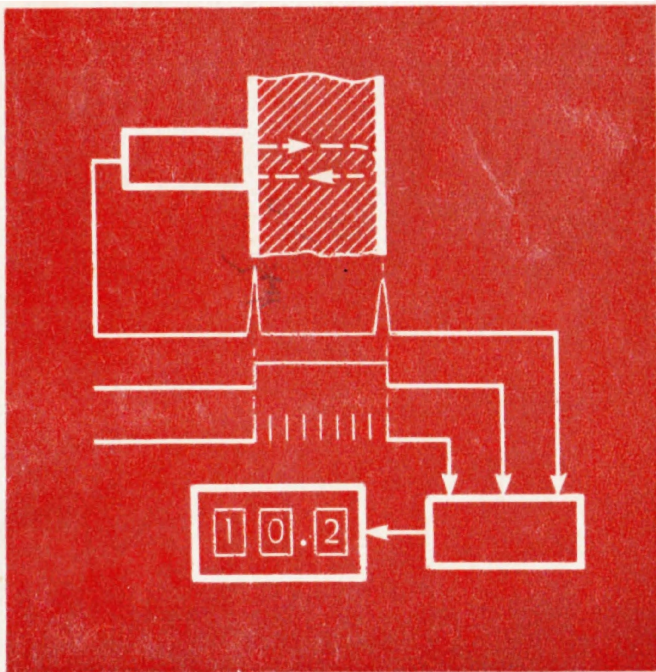




БИБЛИОТЕКА ПРИБОРОСТРОИТЕЛЯ



М. В. КОРОЛЁВ

ЭХО-ИМПУЛЬСНЫЕ ТОЛЩИНОМЕРЫ

М. В. КОРОЛЁВ



БИБЛИОТЕКА ПРИБОРОСТРОИТЕЛЯ

ЭХО-ИМПУЛЬСНЫЕ ТОЛЩИНОМЕРЫ



МОСКВА

«МАШИНОСТРОЕНИЕ»

1980

ББК 34.9

К66

УДК 531.717

Рецензент *И. Н. Ермолов*

Королев М. В.

К66 Эхо-импульсные толщиномеры. — М.: Машиностроение, 1980. — 111 с., ил.

35 к.

В книге рассмотрены принципы построения современных эхо-импульсных ультразвуковых толщиномеров и пути их совершенствования; даны сведения о методах повышения точности и расширения диапазона измерений. Большое внимание уделено разработке нового типа широкополосных пьезопреобразователей и особенностям электроакустического тракта толщиномеров с их применением.

Книга представляет интерес для специалистов, занимающихся разработкой и эксплуатацией ультразвуковой измерительной и дефектоскопической аппаратуры, а также использующих ультразвук в физических исследованиях.

К 31305-266 266-80. 2706000000
038(01)-80

ББК 34.9
6П5.8

© Издательство «Машиностроенис», 1980 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Разработка и непрерывное совершенствование передовых методов и технологии изготовления деталей и машин, особенно при крупносерийном производстве, выдвинуло на первый план проблему повышения их надежности и долговечности. В решении этой народнохозяйственной проблемы громадную роль играет неразрушающий контроль качества изделий.

Среди широкого многообразия конкретных задач, решаемых средствами неразрушающего контроля, важное место занимает контроль толщины изделий или их отдельных частей при одностороннем доступе к ним. Особое значение в настоящее время приобретает измерение толщины изделий в процессе эксплуатации. Уменьшение толщины стенки ухудшает прочностные характеристики изделий и может привести к авариям, если это не было обнаружено вовремя. При этом в большинстве случаев толщину изделий необходимо измерять при одностороннем доступе к ним (в обшивках судов, в баллонах высокого давления в котельных трубах, в резервуарах, работающих в агрессивных средах и т. д.).

Повышенные и зачастую противоречивые требования к деталям и узлам современных машин, например, такие, как предельно малая масса и высокая прочность, приводят к необходимости применения высокопрочных, жаропрочных и легких металлов и сплавов, а также к изготовлению отдельных деталей и узлов из них с крайне малым запасом прочности, т. е. с очень тонкими стенками и оболочками, к использованию тонких металлических лакирующих покрытий на металлах и неметаллах и т. п. Это в свою очередь приводит к необходимости резко повысить точность измерительной аппаратуры и расширить ее диапазон в область весьма малых толщин.

Отсутствие до самого последнего времени простых и надежных широкодиапазонных толщиномеров, позволяющих измерять толщины изделий из металлов от десятых и сотых долей миллиметра до десятков и сотен миллиметров с точностью выше 1—2% при одностороннем доступе к ним, в ряде случаев сдерживало массовое производство этих изделий или резко увеличивало их себестоимость из-за необходимости выборочного разрушающего контроля.

Указанная задача может быть решена с помощью различных методов, основанных на взаимодействии с измеряемым изделием магнитного поля, электрического тока, рентгеновского или ядерного проникающих излучений, а также с помощью высокочастотных ультразвуковых колебаний. Каждому из указанных методов свой-

ственны как положительные, так и отрицательные качества, однако ультразвуковые методы характеризуются большей универсальностью и могут быть применены для контроля материалов с большой и низкой электрической проводимостью и магнитной проницаемостью, большой или малой плотностью и толщиной.

Основными преимуществами ультразвуковых методов измерения толщины перед другими является независимость результатов измерений от неоднородности и непостоянства магнитной и электрической структуры материала изделия, возможность контроля суммарной толщины биметаллических изделий (например, изделий из ферромагнитных и неферромагнитных металлов и сплавов), отсутствие вредного воздействия на человека излучений (ядерных или рентгеновских) и принципиальная возможность измерения как малых, так и больших (до нескольких метров) толщин.

В настоящее время у нас в стране и за рубежом наибольшее распространение заслуженно получили ультразвуковые толщиномеры, работающие по эхо-импульсному методу, т. е. по методу акустической локации, которым измеряется время пробега импульса ультразвуковых колебаний от поверхности его ввода в контролируемое изделие (слой, стенку и т. п.) до противоположной поверхности и обратно. Это время линейно и однозначно связано с толщиной контролируемого изделия.

Некоторое распространение в настоящее время получили резонансные ультразвуковые толщиномеры и их разновидности (импульсно-резонансные, иммерсионно-резонансные и др.), основанные на измерении частоты, на которой в контролируемом изделии возникают стоячие волны, т. е. наступает акустический резонанс. Главное преимущество этих приборов перед эхо-импульсным состоит в возможности контроля изделий толщиной до десятых долей миллиметров с погрешностью не более 1—2%, тогда как минимальная толщина металлических изделий, поддававшаяся измерению современными серийными эхо-импульсными приборами, составляла до недавнего времени 1—1,5 мм. Исключение составляют несколько зарубежных приборов, например Калипер 104м, Калипер 105 фирмы Branson (Брэнсон, США), позволяющих измерять толщину стальных изделий до 0,25 мм с погрешностью 4—5%. Однако резонансным толщиномерам присущ ряд существенных недостатков, от которых в значительной степени свободны эхо-импульсные приборы; это конструктивная сложность и сложность эксплуатации, необходимость высокой чистоты и параллельности поверхностей контролируемого изделия, узкий диапазон контролируемых толщин (как правило, не более 5—10 мм) и т. д.

Следует отметить также один из серьезнейших недостатков резонансных толщиномеров контактного типа. Он заключается во влиянии прижатой пьезопластины на резонансную частоту колеблющегося изделия. В зависимости от толщины слоя контактной смазки пик резонансной частоты смещается, что вызывает погрешность в 1—3%.

В настоящее время сведения о разработках ультразвуковых, и в частности эхо-импульсных толщиномеров, об исследованиях по созданию новых пьезопреобразователей для них, принципиальных схемах, конструкции и методах повышения их технических характеристик имеются во многих статьях в периодических научно-технических изданиях. Однако до сего времени отсутствует книга, сколько-нибудь систематизирующая и обобщающая указанные вопросы.

Предлагаемая книга является первой попыткой восполнить этот пробел. В ней рассмотрены принцип и особенности эхо-импульсного метода измерения толщины, варианты схем электроакустического тракта с раздельно-совмещенными пьезопреобразователями ультразвуковых колебаний и особенно с применением принципиально нового широкополосного апериодического пьезопреобразователя, разработанного автором. Во второй части книги на примерах самых современных отечественных серийных толщиномеров показан подход к разработке измерительных и индикаторных узлов этих приборов с применением полупроводниковой дискретной электроники и интегральной микроэлектроники. Рассмотрены основные пути совершенствования эхо-импульсных толщиномеров. Можно надеяться, что сведения такого рода окажутся полезными при решении отдельных технических задач для специалистов, занятых разработкой ультразвуковой дефектоскопической и измерительной аппаратуры, ультразвуковых линий задержки, приборов для ряда физических исследований и т. п.

Кроме классического эхо-импульсного метода измерения толщины, о котором речь пойдет ниже, существует целый ряд разновидностей импульсного и фазового методов, такие как геометрический эхо-метод, метод прямоугольного импульса, метод измерения частоты повторения импульсов, многократно отраженных в объеме контролируемого изделия от его поверхностей, импульсно-фазовый метод, разностно-частотный и др. [7]. Однако эти разновидности методов измерения толщины, подробно рассмотренные в целом ряде работ, в настоящее время или вообще не используются на практике из-за принципиально низкой точности измерений, которую они обеспечивают, и низкой производительности контроля (например, эхо-метод) или приводят к неоправданному усложнению аппаратуры, которое приемлемо только в тех случаях, когда требуется прецизионное (с погрешностью менее 0,5%) измерение толщины особо ответственных изделий. Например, известен метод измерения многократных отражений, или метод синхрокольца, при котором измеряется частота повторения сигналов на выходе генератора с запаздывающей обратной связью, где роль акустической линии задержки выполняет стенка измеряемого изделия.

ЭХО-ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ

1. РАЗНОВИДНОСТИ АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА ЭХО-ИМПУЛЬСНЫХ ТОЛЩИНОМЕРОВ

Эхо-импульсный метод измерения толщины основан на способности ультразвуковых волн отражаться от границы двух сред, отличающихся акустическим сопротивлением, равным произведению плотности среды на скорость распространения в ней ультразвука (здесь и далее имеется в виду частный случай акустического сопротивления — характеристический акустический импеданс, или удельное волновое сопротивление среды). Метод состоит в измерении времени пробега ультразвуковых импульсов между поверхностями измеряемого изделия. Это время прямо пропорционально толщине изделия и обратно пропорционально скорости ультразвука в его материале.

В настоящее время наибольшее распространение получили четыре разновидности акустического тракта эхо-импульсных толщиномеров: контактный с применением раздельно-совмещенного пьезопреобразователя, контактный с совмещенным пьезопреобразователем с твердотельной линией задержки и без нее и иммерсионный с совмещенным пьезопреобразователем.

На рис. 1, *a* показан акустический тракт с контактным раздельно-совмещенным пьезопреобразователем. Электрические импульсы электронного генератора, поступающие на клемму *G*, возбуждают излучающий пьезоэлемент *1*, который контактирует с измеряемым изделием *4* через призму *2* и тонкий слой контактной смазки *3*. Ультразвуковые импульсы от пьезоэлемента *1* распространяются по призме, проходят слой контактной смазки и попадают в изделие. Отразившись от его внутренней поверхности под некоторым небольшим углом, эти импульсы, пройдя также через слой контактной смазки и вторую призму *5*, попадают на приемный пьезоэлемент *6* и после обратного преобразования из акустических в электрические поступают через клемму *У* на вход электронного усилителя. Оба пьезоэлемента, раздельно выполняющие функции излучателя и приемника, призмы и электроакустический экран *7*, предотвращающий прохождение акустических и электрических помех с излучающего на приемный пьезоэлемент, конструктивно совмещены для удобства сканирования в одном корпусе; отсюда название — раздельно-совмещенный пьезопреобразователь [7, 6, 61].

Временной интервал T_1 между моментом излучения ультразвукового импульса пьезоэлементом *1* и приемом его пьезоэлементом *6* складывается из интервалов времени T_2 и T_3 прохождения его соответственно по одной и по другой призме, которые, как правило, делают разновысокими, и удвоенного времени T прохождения по

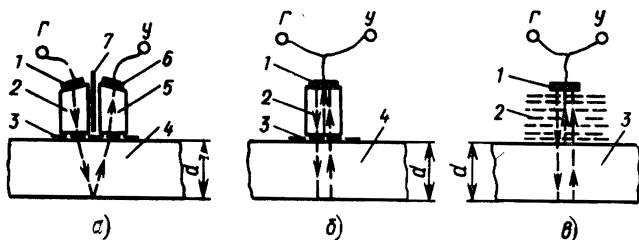


Рис. 1. Варианты акустического тракта

контролируемому изделию — от внешней его поверхности до внутренней (по отношению к пьезопреобразователю) и обратно. Толщина контролируемого изделия

$$d = \frac{1}{2} c (T_1 - T_2 - T_3) = \frac{1}{2} cT, \quad (1)$$

где c — скорость ультразвука в материале измеряемого изделия.

В данной формуле не учитывается время пробега импульса по слою контактной смазки, которое на практике пренебрежимо мало по сравнению с временем T . Ниже будут отдельно рассмотрены случаи, когда это время приходится учитывать.

Из формулы (1) видно, что в измерительном тракте толщиномеров с раздельно-свмещенными пьезопреобразователями необходимо осуществление операции вычитания из измеряемого временного интервала постоянной составляющей $T_2 + T_3$.

На рис. 1 показан акустический тракт с совмещенным пьезопреобразователем и твердотельной (рис. 1, б) и жидкостной (рис. 1, в) ультразвуковыми линиями задержки. Пьезоэлемент 1, контактирующий с измеряемым изделием через акустический волновод 2 (ультразвуковую линию задержки), обычно представляющий собой цилиндр из материала с малым затуханием ультразвука (магния, дюралюминия и т. п.), и слой контактной смазки 3, попеременно выполняет функции излучателя и приемника ультразвуковых колебаний (отсюда название — совмещенный).

Генератор электрических импульсов возбуждает пьезоэлемент 1. Часть энергии ультразвукового импульса, прошедшего линию задержки, отражается от внешней поверхности измеряемого изделия обратно в сторону пьезоэлемента, а часть энергии проходит внутрь изделия и, отразившись от внутренней поверхности, также возвращается к пьезоэлементу, вновь пересекая границу раздела линии задержки и изделия. На этой границе еще раз происходит частичное отражение энергии ультразвукового импульса, что приводит к многократным отражениям этих импульсов, постепенно убывающих по амплитуде, причем при каждом отражении от внешней поверхности изделия часть энергии уходит в линию задержки и попадает на пьезоэлемент. Таким образом, спустя удвоенное время T_1 прохождения по линии задержки на тот же пьезоэлемент 1, выполняющий теперь функцию приемника, попадает серия ультразвуковых импульсов, преобразуемая им в электрические сигналы, поступающие далее на вход электронного усилителя.

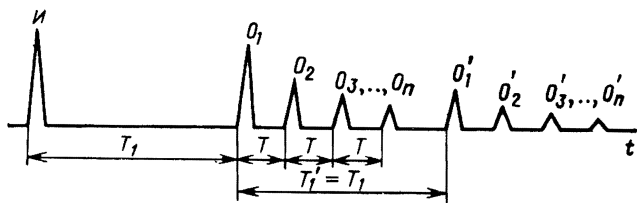


Рис. 2. Эпюра электрических импульсов на пьезоэлементе совмещенного пьезопреобразователя

На рис. 2 показана эпюра электрических импульсов на пьезоэлементе: I — импульс с генератора, возбуждающий пьезоэлемент в режиме излучения; O_1 и O_2 — импульсы, отраженные от внешней и внутренней поверхностей измеряемого изделия; O_3, \dots, O_n — импульсы многократных отражений между поверхностями измеряемого изделия. Временные интервалы T между импульсами O_1, \dots, O_n одинаковы. Они равны удвоенному времени прохождения ультразвуковых импульсов между поверхностями контролируемого изделия и прямо пропорциональны его толщине.

Строго говоря, интервал между импульсами O_1 и O_2 несколько больше интервалов между следующими парами импульсов: $O_2—O_3$, $O_3—O_4$ и т. д. Это объясняется тем, что импульс O_1 отражается не от внешней поверхности измеряемого изделия, а от ближней к линии задержки поверхности слоя контактной смазки 3, толщина которого мала, а значит, и время прохода по нему ультразвука пренебрежимо малы. Случаи, когда нельзя пренебречь этим временем, будут рассмотрены ниже. На практике, несмотря на то, что временные интервалы между всеми импульсами, начиная с O_2 , строго равны между собой и не зависят от толщины слоя контактной смазки (в чем легко убедиться, проследив ход ультразвуковых импульсов [66]), толщину, как правило, измеряют по первому интервалу T между импульсами O_1 и O_2 . Это объясняется тем, что импульс O_2 , первый из отраженных от внутренней поверхности, имеет наибольшую амплитуду.

Следует отметить, что временной интервал между импульсами $O_1—O_2$ целесообразно выбирать еще и потому, что при контроле изделий с одной или двумя заметно шероховатыми поверхностями импульс O_2 оказывается наименее искаженным, так как претерпевает лишь однократное отражение от внутренней поверхности. Толщина измеряемого изделия находится по формуле $d = cT/2$.

С изменением толщины эхо-импульсы O_2, \dots, O_n перемещаются по оси времени и при увеличении толщины интервал между импульсами растет. Вся последовательность импульсов O_1, \dots, O_n в реальных условиях претерпевает многократные отражения в линии задержки между пьезоэлементом и внешней поверхностью контролируемого изделия и соответственно многократно фиксируется пьезоэлементом (импульсы $O'_1—O'_n$). По этой причине длину линии задержки следует выбирать такой, чтобы при измерении изделий с максимальной толщиной, на которую рассчитан конкретный прибор или преобразователь, время T_1 было больше времени T_{\max} , соответствующего максимальной измеряемой толщине изделия,

Необходимым условием нормальной работы акустического тракта с контактными пьезопреобразователями является плотное их прилегание к поверхности измеряемого изделия, т. е. толщина слоя контактной смазки должна быть минимально возможной. Иммерсионный вариант акустического тракта с совмещенным пьезопреобразователем (см. рис. 1, в) лишен этого недостатка. Он отличается от контактного варианта (см. рис. 1, б) только тем, что твердотельная ультразвуковая линия задержки заменена жидкостной (2 на рис. 1, в). При этом если высота столба жидкости между пьезоэлементом и поверхностью измеряемого изделия такова, что $T_1 > T_{\max}$, то показания прибора не зависят от расстояния между преобразователем и изделием.

На практике герметизированный пьезопреобразователь и измеряемое изделие помещают в специальную ванну, заполненную иммерсионной жидкостью, в качестве которой чаще всего используют воду, спирт или жидкие масла. Важнейшее преимущество иммерсионного метода перед контактным состоит в отсутствии механического контакта между изделием и пьезопреобразователем. Это позволяет с высокой скоростью перемещать их относительно друг друга и сканировать всю поверхность изделия, т. е. осуществлять стопроцентный автоматический контроль изделий.

Кроме рассмотренных выше, существует целый ряд разновидностей акустического тракта эхо-импульсных толщиномеров: контактный с отдельными излучателем и приемником, контактный с локальной иммерсионной ванночкой, щелевой иммерсионный вариант с применением совмещенных и раздельно-совмещенных преобразователей и т. д.

Под щелевым вариантом мы понимаем разновидность контактного варианта, в котором пьезопреобразователь не имеет механического контакта с поверхностью изделия и находится от него на небольшом (обычно 0,5—2 мм) расстоянии. В щель между преобразователем и изделием постоянно в процессе измерений подливается контактная жидкость (обычно вода) для поддержания акустического контакта. Этот вариант акустического тракта используют обычно для автоматизации и увеличения скорости контроля.

Указанные акустические тракты используются для решения конкретных специальных задач ультразвуковой толщинометрии и дефектоскопии. При необходимости с ними можно ознакомиться в работах [7, 12, 45, 49, 61, 66].

Отметим, что на практике широко применяют эхо-импульсный метод измерения толщины с совмещенными контактными пьезопреобразователями без линии задержки, который легко реализуется во всех серийных эхо-импульсных ультразвуковых дефектоскопах. При этом временной интервал T_1 (рис. 2), очевидно, равен нулю и измерения ведутся с помощью глубиномера или электронно-лучевой трубки, имеющихся в любом дефектоскопе, по временному интервалу T между зондирующим импульсом I и O_1 ($O_2—O_n$). Одним из недостатков такого использования дефектоскопов является большая мертвая зона (см. гл. II), что не позволяет измерять толщины менее 3—5 м с погрешностью не более 3—5%.

2. ТОЧНОСТЬ ЭХО-ИМПУЛЬСНЫХ ТОЛЩИНОМЕРОВ

Точность измерений толщины с помощью эхо-импульсных ультразвуковых толщиномеров определяется ошибкой, обусловленной (как

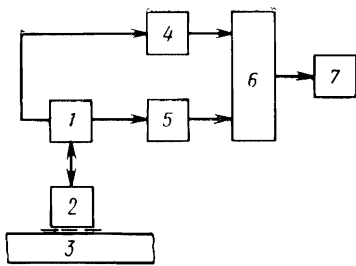


Рис. 3. Блок-схема измерения эхо-импульсным толщиномером

объекта 3, вырабатывает на одном из своих выходов импульсы начала отсчета временного интервала, на другом — импульсы конца отсчета. Эти импульсы запускают пороговые схемы 4 и 5 отсчета соответственно начала и конца временного интервала. Информация с выходов схем 4 и 5 поступает на схему 6 преобразования временного интервала в электрические ток, напряжение или в последовательность электрических импульсов, величины и число которых пропорциональны измеряемому временному интервалу, и могут быть измерены микроамперметром, вольтметром или подсчитаны цифровым счетчиком 7, которые градуируются в единицах толщины.

Методическая погрешность возникает вследствие того, что крутизна переднего фронта эхо-импульсов, между которыми измеряется временной интервал T , конечна. Поэтому длительность интервала T' между моментами начала и конца отсчета схемами 4 и 5 (рис. 3) является функцией уровней отсчета U_1 и U_2 (рис. 4, а), на которых этот интервал измеряется, а при неизменном уровне измерения — функцией амплитуды эхо-сигналов, и в первую очередь эхо-импульса, отраженного от внутренней поверхности измеряемого изделия. Амплитуда этого импульса подвержена большим изменениям в силу целого ряда причин: из-за нарушения качества акустического контакта, непараллельности поверхностей изделий, шероховатости донной поверхности, различного затухания ультразвука в разных материалах, изменения толщины во всем диапазоне измерений, уменьшения чувствительности раздельно-совмещенных пьезопреобразователей как в области малых толщин (особенно в диапазоне 1—5 мм),

и в любом приборе косвенного измерения) методической, систематической, инструментальной и случайной погрешностями.

Обобщенная блок-схема измерения эхо-импульсными толщиномерами показана на рис. 3. Приемно-передающее устройство 1, состоящее из генератора импульсов, возбуждающих пьезопреобразователь 2, и усилителя, усиливающего эхо-импульсы, несущие информацию о толщине измеряемого

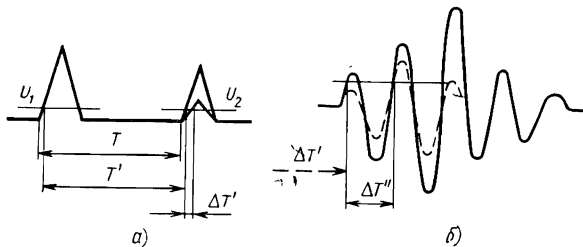


Рис. 4. Методическая погрешность:

а — из-за конечной крутизны фронтов эхо-импульсов; б — из-за «потери» волны

так и в области больших толщин (более 50—100 мм) и т. д. Это приводит к «сползанию» точки отсчета времени в большую сторону на величину $\Delta T'$ (рис. 4).

Методическая погрешность особенно сказывается на малых (менее 2 мм) толщинах, так как крутизна фронтов ультразвуковых импульсов на частотах 2,5 и 5 МГц, обычно используемых в эхо-импульсных толщиномерах, сравнима с измеряемыми временными интервалами на этих толщинах. Так, при измерении толщины стального образца толщиной 1 мм (при скорости ультразвука в нем 6000 м/с) на частоте 2,5 МГц изменение амплитуды импульса всего лишь в 2 раза приводит к погрешности приблизительно 1,5—2%. Если учесть, что амплитуда эхо-импульсов, отраженных от внутренней поверхности измеряемого изделия (например, у раздельно-совмещенных пьезопреобразователей на частотах 2,5 и 5 МГц в диапазоне толщин 1—3 мм) может изменяться в десять и более раз, то методическая погрешность измерений в этом диапазоне доходит на практике до 10—20% измеряемого значения. Именно поэтому на практике минимальные толщины, которые поддаются измерению с помощью раздельно-совмещенных пьезопреобразователей, как в отечественных, так и в зарубежных приборах составляют 1—2 мм при погрешности измерений не менее 5—15%.

Еще одна характерная причина погрешности, вызываемой изменением амплитуды эхо-сигнала, это дискретный скачок показаний прибора из-за «потери» волны. Реальные эхо-импульсы на выходе приемного пьезопреобразователя, как правило, имеют форму колоколообразного радиоимпульса (рис. 4, б). Амплитуды первых полуволн в этих импульсах, по которым обычно ведется отсчет временных интервалов, меньше последующих. Поэтому при значительном уменьшении амплитуды эхо-импульсов возможен переход момента срабатывания измерительной схемы с первого на второй и на последующие периоды колебания, как это показано на рис. 4, б. Если небольшое изменение амплитуды без потери волны принципиально может привести к погрешности не более $1/4$ длины волны, то большие изменения амплитуды могут дать погрешность в одну и более волн, что практически исключает измерение малых толщин. В то же время потеря одной и даже двух волн на толщинах более 50—100 мм приводит к погрешности, которая для пьезопреобразователей с резонансной частотой 2,5 МГц составляет 2—5%, что часто оказывается вполне приемлемым на практике измерений многих не очень ответственных изделий.

Из сказанного видно, что основными средствами уменьшения методической погрешности могут быть:

- 1) увеличение амплитуды принимаемых эхо-импульсов за счет увеличения амплитуды импульсов, возбуждающих излучающий пьезоэлемент, увеличения коэффициента усиления усилителя, снижения порогов срабатывания схемы измерителя временных интервалов; однако эти меры имеют предел, определяемый уровнем собственных акустических и электрических помех реальных пьезопреобразователей [9], которые еще будут кратко рассмотрены в гл. II;

- 2) повышение частоты заполнения ультразвуковых импульсов и, как следствие, увеличение крутизны фронтов принимаемых эхо-сигналов; однако это возможно лишь до тех пор, пока уменьшение амплитуды импульсов из-за увеличения затухания ультразвука не начнет вносить заметную погрешность, так как затухание увеличивается с ростом частоты.

Систематическая погрешность эхо-импульсных толщиномеров вызывается изменением толщины слоя контактной смазки между рабочей поверхностью преобразователя и измеряемым изделием с криволинейной и грубообработанной поверхностью при перемещении преобразователя по его поверхности, а также при измерении изделий клиновидной формы.

Уменьшение ширины рабочей поверхности преобразователя позволяет уменьшить систематическую погрешность за счет уменьшения высоты сегмента или клина, образуемого соприкасающимися поверхностями преобразователя и изделия. Экспериментально установлено [58], что минимальная ширина рабочей поверхности преобразователя, при которой он сохраняет устойчивость на поверхности изделия и при которой возможен однозначный отсчет толщины, составляет 2—3 мм. При этом, например, переход с радиуса кривизны поверхности изделия от 15 до 20 мм изменяет показания прибора на одной и той же толщине на 0,05 мм.

Уменьшения погрешности на клиновидных изделиях, вызываемой в основном уменьшением амплитуды эхо-сигналов из-за ухода импульсов, отраженных от внутренней поверхности изделия, в сторону от акустической оси приемного пьезоэлемента, можно добиться некоторым увеличением размеров пьезопреобразователя, т. е. увеличением ширины ультразвукового луча. Однако эта мера при углах клина более $5-10^\circ$ и толщинах более 50 мм приводит к крайне большому увеличению размеров преобразователя. Полезно отметить, что при достаточно большой амплитуде принимаемых эхо-импульсов в случае измерения толщины изделий с неизвестным углом клиновидности результаты измерений соответствуют средним значениям толщины на участке акустического контакта с совмещенным пьезопреобразователем (детальнее этот сложный и исключительно важный вопрос импульсной ультразвуковой толщинометрии рассмотрен в работе [51]). На раздельно-совмещенные пьезопреобразователи последнее распространяется только в том случае, если преобразователь ориентирован так, что прямая, образующая угол клина изделия, лежит в плоскости электроакустического экрана 7 (см. рис. 1) между приемным и излучающим пьезоэлементом.

Инструментальная погрешность полностью определяется качеством усилительного и измерительного тракта толщиномера. На нее влияют такие характеристики, как частотная полоса пропускания усилителя, линейность и стабильность измерителя временных интервалов, класс точности стрелочного индикатора, число разрядов в цифровом индикаторе и т. п. Современная электроника дает возможность свести инструментальную погрешность ультразвуковых импульсных толщиномеров до десятых и сотых долей процента, что позволяет практически не учитывать ее при оценке суммарной погрешности эхо-импульсных толщиномеров. Достаточно сказать, что измерители временных интервалов в современных полупроводниковых приборах, заимствованные практически без изменений из арсенала приборов и схем, применяемых в ядерной физике, позволяют измерять временные интервалы от 5 нс до 100 мкс (что соответствует толщинам от 10 мкм до 300 мм) с погрешностью и нелинейностью менее 0,1—0,5% [66].

Случайные погрешности являются следствием субъективной оценки измерения оператором. Ошибки могут быть вызваны неплотным прилеганием пьезопреобразователя к поверхности измеряемого изделия, погрешностью при считывании показаний стрелочного инди-

катора, обусловленной параллаксом. Величина этих ошибок не может быть оценена заранее, однако они могут быть устранены многократным проведением измерений на одном участке, применением стрелочного индикатора с зеркальной шкалой и особенно применением цифрового индикатора, резко увеличивающего однозначность отсчета показаний.

В заключение этого параграфа следует отметить, что аналитический расчет суммарной погрешности эхо-импульсного толщиномера из-за многообразия ее источников, а также из-за противоречивых и порой взаимоисключающих средств ее уменьшения крайне затруднен. Поэтому реальную погрешность толщиномеров при их обработке и испытаниях оценивают экспериментально на стандартных образцах толщины, кривизны клиновидности и шероховатости специально аттестованных поверенными механическими и оптическими приборами.

3. ДИАПАЗОН ИЗМЕРЯЕМЫХ ТОЛЩИН

Диапазон, толщин, поддающихся измерению с помощью эхо-импульсных толщиномеров, зависит от многих факторов, которые можно разбить на две основные группы: факторы, ограничивающие диапазон в сторону измерения малых толщин, и факторы, ограничивающие диапазон измерений в сторону больших толщин.

Диапазон измерений в области малых толщин ограничивается мертвой зоной преобразователей и разрешающей способностью электроакустического тракта [7, 61], под которым мы здесь и ниже будем понимать генератор возбуждающих импульсов, пьезопреобразователь, измеряемое изделие, усилитель эхо-импульсов и схемные узлы, согласующие усилитель и генератор в случае использования совмещенных пьезопреобразователей, хотя, строго говоря, обычно под электроакустическим трактом понимают пьезоэлемент, где происходит электромеханическое преобразование энергии, и непосредственно прилегающие к нему акустические переходные слои и электрические цепи. Мы здесь несколько расширили это понятие для удобства изложения, потому что и генератор, и усилитель, и согласующие их электрические цепи, как правило, отражают специфику применения того или иного специального пьезопреобразователя (см., например, гл. II).

Мертвая зона в случае использования раздельно-совмещенных пьезопреобразователей определяется исключительно акустическим трактом преобразователя и практически не зависит от электронной схемы прибора, так как генератор и усилитель в этом случае «развязаны» настолько, что наводка мощного импульса генератора на вход усилителя не вызывает его перегрузки, которая могла бы вывести его на некоторое время из нормального режима усиления.

Мертвой зоной, в частности, раздельно-совмещенного преобразователя называют ту минимальную толщину изделия, на которой амплитуда эхо-импульса, отраженного от внутренней его поверхности, уменьшается настолько, что становится сравнимой с уровнем помех и не поддается четкой регистрации.

Общая теория, методика и примеры расчета раздельно-совмещенных пьезопреобразователей детально изложены в монографии [12], поэтому мы не будем их подробно рассматривать, а отметим некоторые важные для практики особенности и характеристики раздельно-совмещенных пьезопреобразователей.

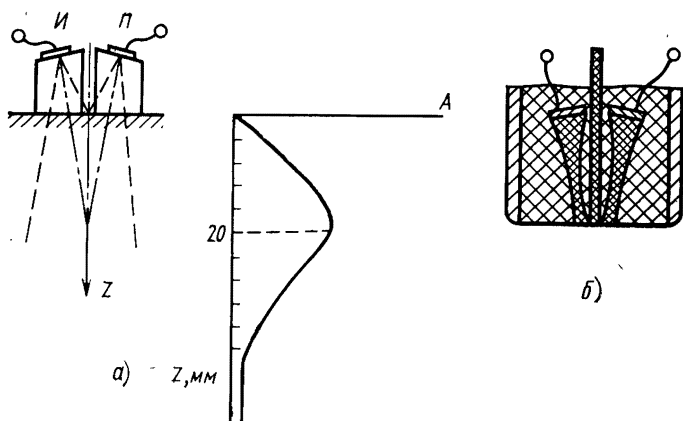


Рис. 5. Акустический тракт с раздельно-совмещенным пьезопреобразователем:

a — кривая чувствительности; *б* — схема пьезопреобразователя с пирамидальными призмами

Ход ультразвуковых лучей в акустическом тракте с раздельно-совмещенным пьезопреобразователем и типичная кривая его чувствительности по глубине z показана на рис. 5, *a* [12]. Из рисунка видно, что максимум чувствительности, или максимум амплитуды A отраженного сигнала, находится примерно в районе точки пересечения акустических осей излучающего *И* и приемного *П* пьезопреобразователей.

Полезно отметить, что с уменьшением толщины измеряемого изделия амплитуда первой полуволны эхо-импульса падает гораздо быстрее амплитуды остальных полуволн. Это вызывает опасность потери волны даже тогда, когда амплитуда сигнала в целом может быть достаточно большой или даже несколько возрасти. Сказанное наглядно иллюстрируется рис. 6, на котором показаны графики изменения максимальной амплитуды A_{\max} и первой A_1 полуволны эхо-импульса раздельно-совмещенных пьезопреобразователей в зависимости от толщины d измеряемого изделия. Характер кривых для преобразователей на 2,5 и 5 МГц весьма близок, однако для измерения толщин ниже 5—10 мм следует использовать частоту 5 МГц, так как при этом вдвое снижается методическая погрешность из-за более крутого переднего фронта эхо-импульсов.

Минимальную мертвую зону и соответственно минимальные измеряемые толщины (0,5—1 мм) имеет раздельно-совмещенный пьезопреобразователь, показанный на рис. 5, *б* [А.с. 407230 (СССР)]. Его призмы имеют форму пирамид, широких в месте приклейки пьезоэлементов и сужающихся в месте контакта с контролируемым изделием.

Ограничение толщин, поддающихся измерению с помощью раздельно-совмещенных пьезопреобразователей по максимуму, в основном определяется уровнем собственных помех преобразователя, его чувствительностью в дальней зоне, амплитудой импульса возбуж-

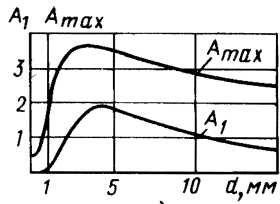
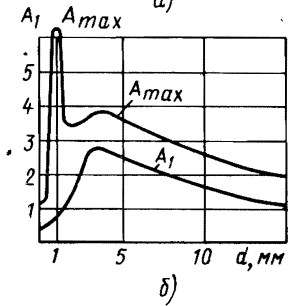


Рис. 6. Зависимость максимальной амплитуды и амплитуды первого полупериода эхо-импульса в раздельно-совмещенном пьезопреобразователе от толщины образца: а—на 2,5 МГц; б—на 5 МГц



дающего генератора и коэффициентом усиления приемного усилителя. Однако здесь нередко существенную роль играет коэффициент затухания ультразвука в материале конкретного изделия, и максимальная толщина прозвучивания может оказаться на практике много меньше той, которая определяется предыдущими рассуждениями. Это главным образом относится к изделиям из пластмасс, слоистым изделиям типа текстолит, крупнозернистым металлам и сплавом, к пористым типам керамики и т. п.

Исходя из этих соображений, для расширения диапазона измеряемых толщин в большую сторону целесообразно уменьшать рабочую частоту ультразвуковых колебаний, так как с понижением частоты затухание ультразвука резко снижается практически во всех материалах. Это, кстати говоря, относится ко всем типам пьезопреобразователей.

Диапазон толщин, поддающихся измерению большинством серийных раздельно-совмещенных пьезопреобразователей, лежит в пределах 2—300 мм, причем при погрешности измерений не более 2% минимальные толщины составляют 5—10 мм.

Совмещенные пьезопреобразователи с акустической линией задержки чаще всего применяют для измерения толщин ниже 5—10 мм, так как для измерения больших толщин пришлось бы резко увеличивать их габаритные размеры за счет увеличения длины линии задержки (см. параграф 1). Поэтому целесообразно рассмотреть возможности этих преобразователей с точки зрения измерения малых толщин.

Параллельное включение выхода генератора, пьезоэлемента и входа усилителя (см. рис. 1, б, в), даже если на этом входе имеется хороший амплитудный ограничитель напряжения, приводит к заметной перегрузке усилителя и, как следствие, к его обратимой неработоспособности в течение некоторого интервала времени [45, 61]. В транзисторных усилителях это время обычно составляет 0,5—5 мкс.

В связи с этим на требования, предъявляемые к длине акустической линии задержки, рассмотренные выше, накладывается и то, что время задержки в ней T_1 должно превышать время восстановления усилителя $t_{\text{в}}$ (рис. 7), перегружаемого генераторным импульсом. При выполнении этого условия минимальная толщина, поддающаяся измерению, определяется разрешающей способностью электроакустического тракта, зависящей от длительности излучаемого и принимаемого акустических импульсов (чем меньше длительность этих импульсов, тем меньше доступная измерению толщина). Как видно из рис. 7, минимальная толщина, на которой можно отдельно зафиксировать импульсы, отраженные от внешней O_1 и внутренней O_2'' поверхностей измеряемого изделия, равна длительности $t_{\text{и}}$ импульса O_1 . Дальнейшее приближение импульса O_2 к O_1 приводит к их слиянию и невозможности зафиксировать их отдельно.

Во избежание затягивания электрических импульсов в усилителе в последнее время в эхо-импульсных толщиномерах стали применять почти исключительно не резонансные, а апериодические широкополосные усилители.

В настоящее время существует много способов получения коротких ультразвуковых импульсов с мощностью пьезопреобразователей. Наиболее эффективные из них будут подробно рассмотрены в следующей главе. Здесь лишь отметим, что в современных эхо-импульсных толщиномерах используют ультра-

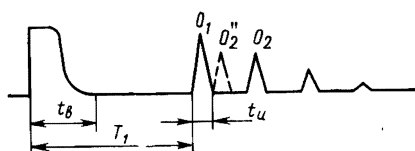


Рис. 7. Временная диаграмма импульсов на выходе усилителя в совмещенном варианте электроакустического тракта толщиномера

звуковые импульсы длительностью в десятки и даже единицы наносекунд, что позволяет измерять толщины изделий из металлов до 0,1 мм в контактном варианте и до 10 мкм в иммерсионном с погрешностью 1—2% [24—27].

В рамках этой небольшой книги мы не рассматриваем возможности применения в эхо-импульсных толщиномерах других типов пьезопреобразователей, например контактных совмещенных без ультразвуковой линии задержки, раздельно-совмещенных иммерсионных, совмещенных и раздельно-совмещенных с щелевым контактом с изделием и т. п. [7, 12, 45, 49, 61], так как они не нашли широкого применения в специализированных толщиномерах, хотя и применяются широко на практике при использовании эхо-импульсных дефектоскопов в качестве толщиномеров.

ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИЙ ТРАКТ ЭХО-ИМПУЛЬСНЫХ ТОЛЩИНОМЕРОВ

1. ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКИХ СХЕМ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА С РАЗДЕЛЬНО-СОВМЕЩЕННЫМИ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

Теория и практические варианты раздельно-совмещенных пьезопреобразователей подробно и всесторонне описаны в целом ряде работ [12, 50, 61]. Здесь же мы коротко рассмотрим некоторые варианты практических схем включения этих пьезопреобразователей, используемых в эхо-импульсных толщиномерах.

На рис. 8 показана схема электроакустического тракта толщиномера «Кварц-6». Генератор, возбуждающий излучающий пьезоэлемент, состоит из ключевого трансформаторного формирователя на транзисторе $T3$ и трансформаторе Tp , запускаемого импульсами напряжения положительной полярности, и мощного составного эмиттерного повторителя на транзисторах $T1, T2$. На излучающем пьезоэлементе емкостью до 1500 пФ формируются электрические импульсы амплитудой до 100 В длительностью 1—2 мкс и передним фронтом порядка 50—70 нс. Генератор рассчитан на работу со стандартными раздельно-совмещенными пьезопреобразователями на частоту 2,5 и 5 МГц без какого-либо изменения параметров генерируемых импульсов.

Недостатки генератора состоят в его сравнительной сложности и большой длительности импульса. Низкочастотные составляющие его спектра приводят к возникновению в пьезоэлементе сильных радиальных колебаний, создающих сравнимые по амплитуде с полезными сигналами низкочастотные акустические помехи. По этой причине в усилитель эхо-сигналов ($T4—T10$) пришлось ввести кроме индуктивности L , шунтирующей присмычный пьезоэлемент Π и снижающей уровень низкочастотной составляющей принимаемых сигналов, еще и частотно-зависимую обратную связь в каждом из двух каскадных усилительных каскадов: $C1, R1, C2, R2$ ($T4, T5$) и $C3, R3; C4, R4$ ($T6, T7$).

На выходе линейного полосового предварительного усилителя имеется амплитудный детектор $D6$, являющийся одновременно амплитудным ограничителем «снизу», который предназначен для отсеки импульсных акустических помех, имеющих амплитуду, меньшую, чем у полезных эхо-импульсов. Уровень отсеки подстраивается потенциометром $R5$ под конкретные образцы пьезопреобразователей.

За детектором следует два нелинейных каскада усиления и ограничения по амплитуде ($T8, T9$) и эмиттерный повторитель $T10$. Общий коэффициент усиления составляет $(5—8) \cdot 10^3$.

На рис. 9 показана схема электроакустического тракта толщиномера УТ-30ПЦ [34]. Генератор, выполненный по схеме ждущего релаксатора на цепочке диноисторов $D2—D4$, формирует на пьезо-

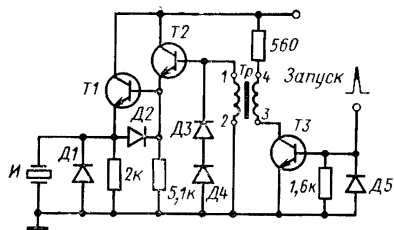


Рис. 8. Принципиальная схема электроакустического тракта толщиномера «Кварц-6» (транзисторы $T1$ — КТ602А; $T2, T3$ — КТ601А; $T4$ — $T10$ — ГТ416Б; диоды $D1$ — Д223; $D2, D5$ — Д9Д; $D3, D4$ — Д9Ж; $D6$ — $D8$ — Д220А)

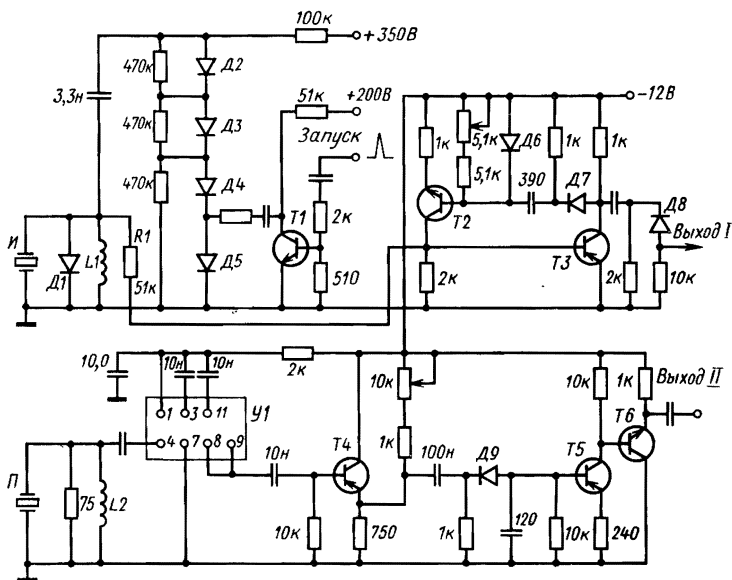
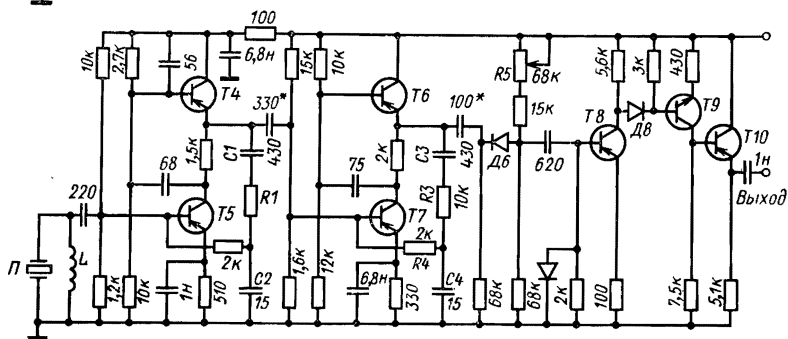


Рис. 9. Электроакустический тракт толщиномера УТ-30ПЦ (транзисторы $T1$ — КТ605Б; $T2$ — КТ342Б; $T3$ — КТ347А; $T4, T5$ — ГТ310Г; $T6$ — КТ315; диоды $D1, D5$ — КД105Г; $D2$ — $D4$ — КН102И; $D6$ — $D8$ — КД513А; $D9$ — Д311А; $У1$ — К1УС222Д; дроссели $L1, L2$ — 2,5 мкГн).

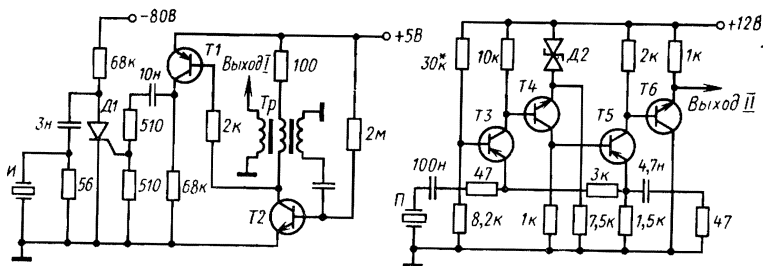


Рис. 10. Электроакустический тракт толщиномера УТ-31МЦ (транзисторы $T1$ —КТ361Г; $T2$, $T6$ —КТ342В; $T3$ —ГТ310Б; $T4$ —КТ316В; $T5$ —КТ363Б; диоды $D1$ —КУ104Г, $D2$ —КС162А)

преобразователе I импульсы в виде полупериода синусоидальных колебаний частотой 2,5 МГц (резонансная частота используемого преобразователя) и амплитудой 150—200 В. Запуск ждущего генератора $D2$ — $D4$ осуществляется импульсами напряжения отрицательной полярности амплитудой 150—180 В с выхода усилителя мощности $T1$, на вход которого («Запуск») поступают импульсы с автоколебательного генератора-синхронизатора, имеющегося в схеме любого толщиномера (см. гл. III).

Колебательный контур, состоящий из электрической емкости излучателя I и индуктивности L , настроен на частоту пьезоэлемента (2,5 МГц). Диод $D1$ поглощает всю энергию контура, за исключением содержащейся в первой полуволне.

Предварительный усилитель выполнен на микросхеме $У1$, амплитудный ограничитель — на запертом эмиттерном повторителе $T4$. Эхо-импульсы с выхода повторителя $T4$ детектируются диодом $D9$ и через усилитель-ограничитель $T5$ и повторитель $T6$ поступают на вход измерителя временных интервалов.

Импульс начала отсчета поступает на измеритель временных интервалов с выхода одновибратора задержки, выполненного на транзисторах $T2$, $T3$, который запускается через $R1$ импульсами с выхода возбуждающего генератора. Время задержки одновибратора равно времени задержки ультразвуковых импульсов в призмах раздельно-совмещенного пьезопреобразователя. Временной интервал T между импульсами, снимаемыми с *Выхода I* и *Выхода II*, пропорционален в соответствии с формулой (1) толщине измеряемого изделия.

На рис. 10 показана схема электроакустического тракта портативного толщиномера УТ-31МЦ [35]. Отличительной особенностью схемы является то, что генератор, возбуждающий пьезоэлемент, выполнен на миниатюрном быстродействующем тиристоре КУ104Г ($D1$), а задающий генератор-синхронизатор на блокинг-генераторе $T2$ одновременно выполняет функцию схемы задержки, компенсирующей время пробега ультразвуковых импульсов по призмам пьезопреобразователя. Длительность импульса блокинг-генератора выбирают равной этому времени. Короткий импульс, соответствующий по времени заднему фронту импульса блокинг-генератора, снимается с *Выхода I*.

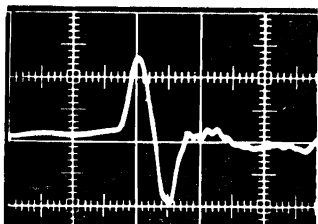


Рис. 11. Осциллограмма акустического импульса, излучаемого предельно демпфированным полуволновым пьезопреобразователем

Вторая и наиболее важная особенность схемы, показанной на рис. 10, состоит в применении широкополосного усилителя импульсов тока $T3—T6$ с входным сопротивлением порядка 3 Ом. Этот компактный четырехтранзисторный усилитель эквивалентен применению в этой схеме усилителя напряжения с коэффициентом усиления $(2—3)10^4$. (В гл. III будут подробно рассмотрены преимущества применения в ультразвуковой аппаратуре усилителей тока с малым входным сопротивлением).

Схема, представленная на рис. 10, рассчитана на работу со стандартным раздельно-совмещенным пьезопреобразователем на частоту 2,5 МГц, таким же, как и в приборах «Кварц-6» и УТ-30ПЦ. Однако в приборе УТ-31МЦ диапазон измеряемых толщин с этим же преобразователем доходит до 300—350 мм (по стали) в отличие от 50 и 100 мм у приборов «Кварц-6» и УТ-30ПЦ.

2. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЭХО-ИМПУЛЬСНЫХ ТОЛЩИНОМЕРОВ

Необходимость повышения разрешающей способности ультразвуковых (УЗ) эхо-импульсных дефектоскопов и толщиномеров возникла практически сразу после создания и начала эксплуатации первых приборов этого типа. Классический способ укорочения УЗ импульсов, излучаемых пьезопреобразователями, за счет снижения их механической добротности путем демпфирования оказывается недостаточно эффективным. Это привело к активным поискам новых, более действенных способов получения коротких УЗ импульсов.

Необходимо сказать, что цель укорочения излучаемых УЗ импульсов — повышение разрешающей способности по глубине — одинакова при создании как толщиномеров, так и дефектоскопов. Однако в последних при этом стремятся сохранить максимальную чувствительность к дефектам, т. е. максимальный коэффициент электромеханического преобразования. В УЗ толщиномерах такая задача, как правило, не стоит в связи с тем, что предельно короткие УЗ импульсы используют при измерении малых толщин (от 5—10 мм и ниже), а для измерения больших толщин применяют высокоэффективные раздельно-совмещенные и прямые совмещенные искатели.

В УЗ дефектоскопии широко используют следующие способы расширения полосы пропускания пьезопреобразователей и электроакустического тракта в целом: последовательное или параллельное включение пьезоэлемента и электрического колебательного контура, несколько расстроенных по частоте относительно друг друга [12];

использование четвертьволнового протектора в сочетании с акустическим демпфированием пьезоэлемента и др. [9, 13]. Эти способы позволяют существенно (до 30—50%) расширить полосу пропускания преобразователей при сохранении высокой чувствительности.

В подавляющем большинстве современных отечественных и зарубежных толщиномеров с целью укорочения излучаемых УЗ импульсов до сих пор еще широко применяют механическое демпфирование пьезоэлементов в преобразователях. Поэтому прежде чем рассмотреть более эффективные способы укорочения УЗ импульсов, мы кратко остановимся на сущности и предельных возможностях механического демпфирования.

Пьезоэлемент приклеивают к массивному демпферу, который изготовляют из материала с большим акустическим сопротивлением и большим коэффициентом затухания ультразвука. Жесткая связь с демпфером приводит к тому, что после окончания действия возбуждающего электрического импульса свободные колебания пьезоэлемента быстро затухают, причем тем быстрее, чем ближе акустические сопротивления демпфера и пьезоэлемента. Большой коэффициент затухания в материале демпфера необходим, чтобы исключить появление паразитных импульсов, вызванных многократным отражением УЗ колебаний, излученных пьезоэлементом в демпфер.

Одно время для демпферов широко применяли текстолит, характеризующийся весьма высоким коэффициентом затухания на частотах УЗ колебаний выше 1 МГц [12, 61]. Однако в настоящее время практически повсеместно в качестве материала для демпферов используют эпоксидную смолу, смешанную с мелкодисперсным порошком вольфрама [45, 68]. Применение такого демпфера технологично и позволяет в широких пределах изменять его акустическое сопротивление путем изменения весового соотношения смолы и вольфрамового порошка.

Теоретический предел укорочения длительности УЗ импульса, излучаемого пьезоэлементом с механическим демпфером,— это один период синусоидальных колебаний собственной резонансной частоты пьезоэлемента [24, 68]. Этот предел имеет место при демпфировании последнего телом с акустическим сопротивлением, равным акустическому сопротивлению материала, из которого изготовлен сам пьезоэлемент [68], и возбуждении его или крутым перепадом электрического напряжения, или импульсом длительностью в половину периода резонансной частоты пьезоэлемента.

На практике демпфированием пьезоэлемента эпоксидной смолой с вольфрамовым порошком удается получать акустические импульсы длительностью в два-три периода колебаний резонансной частоты. Это дает возможность излучать УЗ импульсы длительностью 0,2—0,5 мкс при собственной резонансной частоте пьезоэлементов 5—10 МГц.

В работе [24] описан пьезопреобразователь акустических импульсов в виде «чистой» волны синусоидальных колебаний (рис. 11) частотой 5 МГц, т. е. длительностью 0,2 мкс. Этот преобразователь состоит из обычной полуволновой пьезопластинки из керамики марки ЦТС-19 с серебряными электродами. К пьезоэлементу сплавом Вуда припаян демпфер из той же пьезокерамики, выполненный в виде конуса — акустической «ловушки». Демпфер припаян к пьезоэлементу своим посеребренным основанием.

Акустическое сопротивление переходных слоев серебро — сплав Вуда — серебро между пьезоэлементом и демпфером близко к аку-

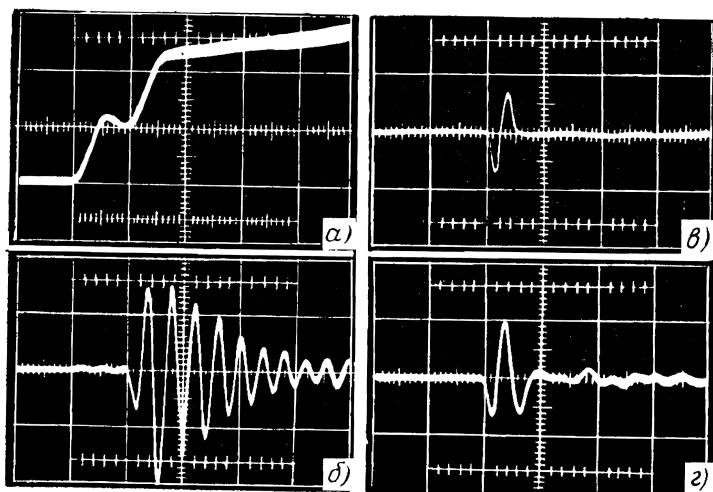


Рис. 12. Осциллограммы:

а — двухступенчатого возбуждающего электрического импульса; *б* — ультразвукового импульса без компенсации (возбуждение одной электрической «ступенькой»); *в* — с компенсацией свободных резонансных колебаний пьезоэлемента; *г* — электрический импульс на приемном пьезоэлементе, сильно демпфированном механически и электрически (масштаб по горизонтали: *а* — 100 нс/см; *б*, *в*, *г* — 450 нс/см)

стическому сопротивлению последних. Однако ввиду некоторой разницы в акустических сопротивлениях, все же имеющей место, на практике не удавалось получать импульсы с удовлетворительным приближением по форме к одному периоду синусоидальных колебаний на частотах выше 5—7 МГц из-за появления многократных отражений УЗ колебаний между пьезоэлементом и демпфером.

Следует отметить, что в последние годы у нас и особенно за рубежом начали применять весьма высокие частоты — до 50—60 МГц [45, 61, 73], стремясь уменьшить длительность излучаемых УЗ импульсов. Использование пьезоэлементов, рассчитанных на такие частоты, в сочетании с демпфированием без переходных слоев (как правило, эпоксидной смолой с наполнителем в виде вольфрамового порошка) позволяет получать весьма короткис импульсы длительностью порядка 40—60 нс, состоящие, как уже говорилось, из двух-трех периодов. Однако это не всегда дает желаемый эффект, так как резко возрастает затухание ультразвука, затрудняется его ввод в контролируемое изделие, что тоже весьма важно. Кроме того, применение тонких высокочастотных пьезоэлементов с емкостью до 3—5 тыс. пФ приводит к необходимости резко повышать мощность генераторов, возбуждающих эти пьезоэлементы.

В последние годы в отечественной литературе появилось много статей, посвященных анализу и экспериментальной проверке методов укорочения акустических импульсов так называемым электрическим демпфированием пьезоэлементов и расширения их частотной

характеристики. Последнее можно обеспечить выбором оптимальной схемы электрического включения как в режиме приема, так и в режиме излучения. В некоторых из этих работ, например [9], рассматривается комплексное применение механического и электрического демпфирования, электрического и акустического согласования пьезоэлементов с нагрузками.

Мы не будем останавливаться на этих способах некоторого укорочения УЗ импульсов, потому что наиболее эффективным из них оказывается только механическое демпфирование при полном акустическом согласовании демпфера с пьезоэлементом. Из-за малой эффективности, сложности практической реализации и необходимости индивидуального подбора элементов схем включения пьезоэлементов эти методы укорочения УЗ импульсов не нашли сколько-нибудь широкого применения в импульсной ультразвуковой аппаратуре.

До последнего времени наиболее эффективным методом укорочения акустических импульсов, излучаемых пьезоэлектрическими преобразователями, считали метод электрической компенсации свободных колебаний излучающего пьезоэлемента [20, 21; 28, 31, 61].

Идея электрической компенсации свободных колебаний состоит в следующем. На полуволновой резонансный пьезоэлемент, не демпфированный ни механически, ни электрически, подается крутой перепад электрического напряжения, возбуждающий в нем синусоидальные механические колебания, которые затухают по экспоненциальному закону. Спустя время, равное половине периода этих колебаний, т. е. колебаний собственной резонансной частоты пьезоэлемента, на последний подается еще один такой же крутой и почти равный ему по амплитуде перепад напряжения, возбуждающий в нем такие же механические колебания, но сдвинутые по фазе на 180° . Суперпозиция затухающих колебаний приводит к их взаимной компенсации по всей длительности этих радиоимпульсов, за исключением первой полуволны колебаний, возникших в результате воздействия первого перепада, возбуждающего электрического напряжения.

Таким образом, при возбуждении недемпфированного пьезоэлемента двухступенчатым импульсом электрического напряжения (рис. 12, а) в механическую нагрузку должен излучаться акустический импульс в виде одной полуволны синусоидальных колебаний собственной резонансной частоты пьезоэлемента [61]. Однако, как показали детальные исследования [69—71], затухание механических колебаний, ударно возбужденных в недемпфированном пьезоэлементе, всегда начинается только с третьей полуволны (рис. 12, б), а вторая полуволна принципиально вдвое больше первой. Поэтому, как легко заметить, суперпозиция двух импульсов вида, представленного на рис. 12, б, должна давать импульс, излучаемый пьезоэлементом, в виде одной полной волны (рис. 12, в), что и имеет место на практике.

В отличие от сильного механического демпфирования пьезоэлементов демпфером с акустическим сопротивлением, равным сопротивлению самого пьезоэлемента, электрическая компенсация свободных колебаний на практике более эффективна и позволяет получать акустические импульсы в виде одного периода синусоидальных колебаний на частотах до 10—12 МГц [28]. Применение этого метода для возбуждения пьезодатчиков с более высокими резонансными частотами затруднено необходимостью существенно повы-

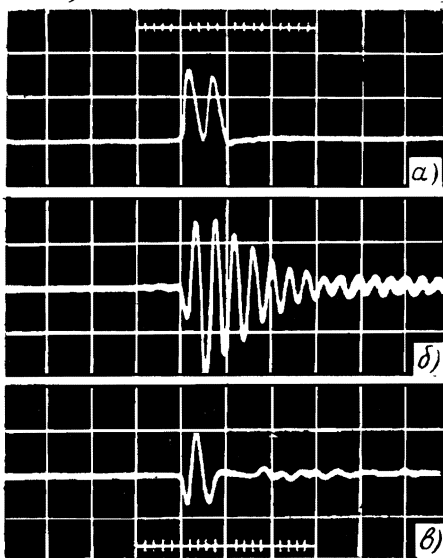


Рис. 13. Осциллограммы:

а — двойного колоколообразного электрического импульса, возбуждающего пьезопреобразователь; *б* — ультразвукового импульса без компенсации; *в* — с компенсацией свободных колебаний (масштаб по горизонтали: *а* — 200 нс/см; *б*, *в* — 450 нс/см)

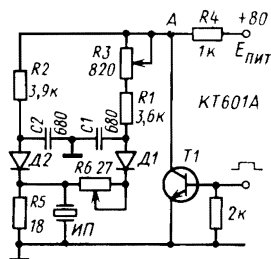


Рис. 14. Принципиальная схема генератора (транзистор *T1* — КТ601А, *D1*, *D2* — диоды КН102И)

шать мощность возбуждающего генератора из-за одновременного увеличения емкости пьезоэлемента и частоты колебаний, и значит, и крутизны фронта импульса генератора.

Существуют довольно простые схемные решения генераторов ступенчатых импульсов для возбуждения пьезоэлементов с компенсацией их свободных колебаний [21, 28]. Эти генераторы используются в ряде приборов — толщиномерах и дефектоскопах с повышенной разрешающей способностью.

Легко показать, что возбуждению полуволнового пьезоэлемента двухступенчатым импульсом с длительностью ступеньки, равной половине периода резонансной частоты пьезоэлемента, эквивалентно возбуждение последнего двойным импульсом, форма которого показана на рис. 13, *а*. При этом длительность каждого из этой пары импульсов должна быть строго равной половине периода резонансной частоты пьезоэлемента. Сказанное наглядно иллюстрируется рис. 13, *а—в* (сравните с рис. 12, *а, б, в*). Следует добавить, что импульсы, показанные на рис. 13, *б, в* и 12, *б, в*, получены с одного и того же пьезодатчика, только возбуждались разными генераторами. Схемное решение (рис. 14) и конструкция генератора двойных колоколообразных импульсов оказались крайне простыми [20], что весьма выгодно отличает его от генераторов двухступенчатых импульсов.

Схема, представленная на рис. 14, работает следующим образом. В исходном состоянии динисторы $D1$ и $D2$ включены, а транзистор $T1$ заперт нулевым смещением. При поступлении на базу $T1$ прямоугольного управляющего импульса положительной полярности транзистор открывается, напряжение в точке A падает до десятых долей вольта, и динисторы выключаются. После окончания управляющего импульса транзистор запирается, переставая шунтировать цепь питания динисторов, и конденсаторы $C1$, $C2$ начинают заряжаться. Напряжения на конденсаторах стремятся к величине $E_{пит}$. Однако как только они достигнут напряжения переключения $U_{пер}$ динисторов, последние включаются. При этом от каждого динистора на общий резистор $R5$ проходит импульс тока. В результате на $R5$ и на излучающем пьезоэлементе $ИП$ возникает пара импульсов напряжения (см. рис. 13, а). Длительность этих импульсов 100 нс, что соответствует половине периода синусоиды 5 МГц. Следует отметить, что длительность управляющего импульса должна превышать $\tau_{выкл}$ — время выключения динисторов. У динисторов КН102И $\tau_{выкл} \leq 5$ мкс.

Время задержки t_3 импульсов на $R5$ относительно друг друга определяется по формуле

$$t_3 \approx \left| \tau_2 \ln \left(1 - \frac{U_{пер2}}{E_{пит}} \right) - \tau_1 \ln \left(1 - \frac{U_{пер1}}{E_{пит}} \right) \right|, \quad (2)$$

где $\tau_2 = C_2(R_2 + 2R_4)$; $\tau_1 = C_1(R_1 + R_3 + 2R_4)$; $U_{пер1}$ и $U_{пер2}$ — напряжения переключения $D1$ и $D2$ соответственно. Если подобрать $D1$ и $D2$ с равными $U_{пер}$, то (2) можно упростить:

$$t_3 \approx -|\tau_2 - \tau_1| \ln \left(1 - \frac{U_{пер}}{E_{пит}} \right).$$

Для подстройки t_3 служит потенциометр $R3$. Для наиболее полной компенсации колебаний излучающего пьезоэлемента амплитуда задержанного импульса должна быть приблизительно на 10—15% меньше амплитуды предыдущего импульса. В схеме, показанной на рис. 14, задерживается импульс, генерируемый $D1$ ($\tau_1 > \tau_2$). Амплитуда этого импульса подстраивается потенциометром $R6$.

Описанный генератор нормально работает при использовании кварцевых или керамических излучающих пьезоэлементов, например из ЦТС-19 емкостью до 1000 пФ.

Совмещенные пьезопреобразователи в режиме приема при эхометоде УЗ дефектоскопии и толщинометрии, если они не демпфированы, имеют тенденцию «звенеть», а значит, затягивать принимаемые акустические импульсы. При использовании метода электрической компенсации свободных колебаний излучающего пьезоэлемента и не предельно возможного механического демпфирования эпоксидной смолой с наполнителем в виде порошка вольфрама все же удавалось получать существенное повышение разрешающей способности эхо-импульсных приборов [31]. Сказанное наглядно иллюстрируется рис. 15. Полученные результаты объясняются следующим образом. Пьезопреобразователь, даже демпфированный, без электрической компенсации излучает УЗ импульсы, состоящие из нескольких периодов колебаний. В режиме приема эти импульсы из-за резонансных свойств пьезопреобразователя удлиняются в 2—3 раза, в результате чего на его выходе появляется электрический

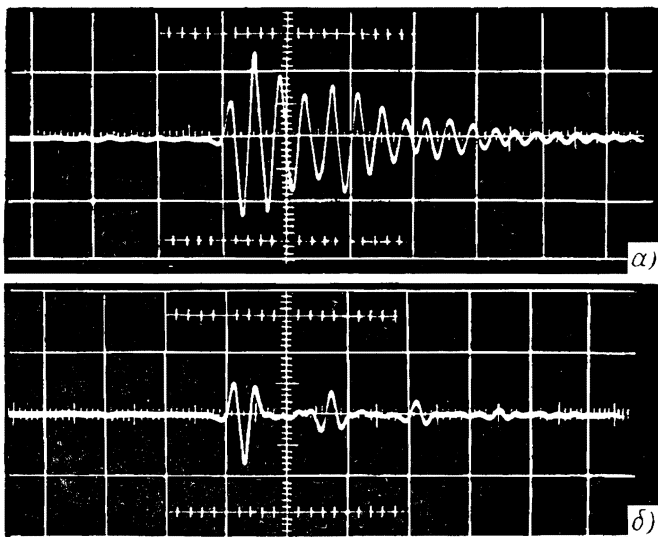


Рис. 15. Осциллограммы эхо-импульсов на пьезопреобразователе в толщиномере при контроле алюминиевой пластинки толщиной 0,46 мм в режиме приема:

а — без электрической компенсации свободных колебаний в режиме излучения; *б* — с компенсацией (масштаб по горизонтали 100 нс/см)

радиоимпульс, состоящий из нескольких периодов колебаний (см. рис. 12, б и 13, б). Если же на преобразователь в режиме приема поступают короткие (один период синусоиды) УЗ импульсы, то на форме электрического импульса, снимаемого с преобразователя, отражаются его резонансные свойства только в режиме приема и длительность импульса увеличивается только на два и даже на один полупериод колебаний, как это хорошо видно из рис. 12, г и 13, в.

Причина и механизм многократного удлинения присмным пьезоэлементом акустических импульсов, состоящих из нескольких периодов колебаний, по сравнению с удлинением однопериодных всего в 1,5—2 раза, детально объясняется в работе [67]. Кратко механизм этого явления объясняется тем, что каждая полуволна принимаемого акустического «радиоимпульса» возбуждает в присмном пьезоэлементе затухающие механические, а значит, и электрические (на его электродах) колебания. Суперпозиция этих затухающих по амплитуде импульсов, число которых равно числу полуволн в принимаемых акустических импульсах, дает многократное увеличение результирующей длительности электрического радиоимпульса на выходе преобразователя.

Предложенные в [38, 61] способы акустической и электрической компенсации свободных колебаний пьезоэлементов в режиме приема мы рассматривать не будем, так как из-за серьезных трудностей в их

реализации и по причинам, о которых еще будет сказано ниже, они не нашли сколько-нибудь широкого практического применения в ультразвуковой аппаратуре.

Возможен еще один вариант способа электрической компенсации свободных колебаний пьезоэлемента «одновременно» в режиме излучения и в режиме приема [17, 72]. Суть его состоит в том, что в результате возбуждения недемпфированного пьезоэлемента в режиме излучения трехступенчатым импульсом преобразователь излучает двойной акустический импульс, аналогичный по форме электрическому импульсу, показанному на рис. 13, а. В режиме приема пьезоэлемент, возбуждаемый акустическими импульсами такой же формы, дает электрический импульс в виде одного периода синусоидальных колебаний.

Несмотря на то, что авторы работы [17] ожидали получить с пьезопреобразователя в режиме приема электрический импульс в виде одной полуволны, на приведенной ими же осциллограмме отчетливо показан импульс, практически представляющий собой один период синусоиды. Это лишний раз подтверждает тот факт, что полуволновые пьезопреобразователи при возбуждении как электрическими, так и акустическими импульсами одной и той же формы и длительности дают одинаковые по форме соответственно акустические и электрические импульсы [68, 69].

Таким образом, способ компенсации свободных колебаний пьезоэлемента при его возбуждении трехступенчатым электрическим импульсом не дает существенно выигрыша по сравнению с рассмотренными выше, а электронная схема генератора, применяемая для его реализации, значительно сложнее чем, например, схема возбуждения пьезопреобразователей электрическим двойным колоколообразным импульсом [20].

Преимущество методов укорочения излучаемых акустических импульсов путем электрической компенсации свободных колебаний пьезоэлементов перед механическим демпфированием состоит в практической возможности получения акустических импульсов в виде одного периода синусоидальных колебаний частотой до 10—20 МГц, т. е. импульсы длительностью до 50—100 нс, что эквивалентно разрешающей способности в стали и алюминии 0,1—0,3 мм.

Недостатками методов электрической компенсации являются:

1) необходимость применения специальных и более сложных схем генераторов сдвоенных импульсов (ступенчатых или двойных колоколообразных);

2) необходимость подстройки генератора с целью наиболее полной компенсации свободных колебаний индивидуально под каждый пьезопреобразователь [20]; это, кстати говоря, относится и к компенсации свободных колебаний пьезоэлемента в режиме приема, о которой говорилось выше (именно из-за этого последнего недостатка метод не нашел широкого практического применения в УЗ импульсной аппаратуре и уж тем более в серийных приборах);

3) резкое увеличение мощности возбуждающего генератора при повышении собственной резонансной частоты пьезоэлемента, т. е. при прочих равных условиях (площадь пьезопластины, марка пьезокерамики, амплитуда излучаемой волны и т. п.) мощность генератора с увеличением частоты растет в квадрате, что особенно нежелательно в полупроводниковых схемах.

Детальное изучение физики процесса возбуждения пьезопреобразователей короткими электрическими и акустическими импульсами открыло широ-

кие возможности резкого повышения разрешающей способности ультразвуковой измерительной и дефектоскопической аппаратуры [70—71].

В работе [9] дан детальный анализ переходных процессов в пьезопреобразователях и приведены многочисленные примеры их практических расчетов на аналоговой вычислительной машине. В работах [68, 69] также подробно описана теория переходных процессов в пьезопреобразователях, которая отличается большой простотой и наглядностью, причем достаточную для практики точность она обеспечивает без привлечения специальной вычислительной техники.

Если к электродам пьезоэлемента приложить короткий импульс электрического напряжения длительностью $\tau_{имп} \leq l/c$, где l — толщина пьезоэлемента, c — скорость распространения продольных УЗ колебаний, то на обеих покрытых металлическими электродами поверхностях пьезоэлемента, поляризованного так, что вектор поляризации \vec{P} , как обычно, перпендикулярен к ним, моментально генерируется давление [68]. Каждая поверхность работает как источник УЗ колебаний, излучаемых как в положительном, так и в отрицательном направлениях (рис. 16, а).

Тот факт, что источниками УЗ колебаний в пьезоэлементах являются их поверхности, несущие металлические электроды, доказан и изучен рядом авторов [62, 65]. Дальнейшее развитие эта теория нашла в работах [19, 36, 37]. Амплитуда волны давления, излучаемой лицевой поверхностью пьезоэлемента (с координатой 0 на рис. 16), обращенной в сторону полезной нагрузки (например, в сторону контролируемого изделия), с акустическим сопротивлением z_1 , выражается как $z_1 h C_0 U / (z_2 + z_1)$, а амплитуда волны, излучаемой внутрь пьезоэлемента (акустическое сопротивление z_2), — как $z_2 h C_0 U / (z_2 + z_1)$. Здесь h — пьезоэлектрическая константа; C_0 — электрическая емкость пьезоэлемента, равная емкости конденсатора, которым является, например, неполяризованный (если он выполнен из пьезокерамики) пьезоэлемент; U — амплитуда приложенного импульса напряжения. Тыльная поверхность пьезоэлемента, соответствующая координате l , ведет себя аналогично; волна, распространяющаяся от нее в пьезоэлемент, имеет амплитуду $z_2 h C_0 U / (z_2 + z_3)$, где z_3 — акустическое сопротивление демпфера, если таковой имеется.

Источниками УЗ колебаний, как уже говорилось, являются только лицевая и тыльная поверхности пьезоэлемента. После излучения первого акустического импульса в момент времени t_0 никакие другие импульсы не покидают преобразователь до момента $t = l/c$, пока волна, возникшая на тыльной поверхности, не достигнет лицевой

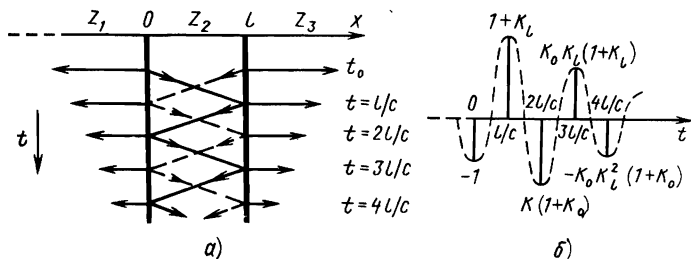


Рис. 16. Пояснение переходных процессов в пьезопреобразователе толщиной l

вой (рис. 16, а). Эта волна частично отражается, частично проходит в нагрузку. Следующий акустический импульс появляется в нагрузке в момент $t=2l/c$ и является частью энергии волны, возникшей на лицевой поверхности в момент t_0 и отраженной от тыльной поверхности в момент $t=l/c$. Так продолжается до полного затухания УЗ колебаний в объеме пьезоэлемента.

На основании уравнений, приведенных в [70], с помощью несложных преобразований М. Редвуд показал [68], что без учета дифракции на краях лицевой поверхности пьезодатчика и некоторых других второстепенных обстоятельств относительные амплитуды импульсов, излучаемых в нагрузку в моменты времени t_0 , $t=l/c$, $t=2l/c$, $t=3l/c$, $t=4l/c$, ..., соответственно равны -1 , $+(1+K_l)$, $-K_l(1+K_0)$, $+K_0K_l(1+K_l)$, $-K_0K_l^2(1+K_0)$, ..., где $K_0=(z_2-z_1)/(z_2+z_1)$ — коэффициент отражения УЗ колебаний по давлению на границе раздела нагрузка — пьезоэлемент; $K_l=(z_2-z_3)/(z_2+z_3)$ — то же, на границе раздела пьезоэлемент — демпфер. Временная диаграмма этих импульсов показана на рис. 16, б (сплошные линии). Она справедлива и для режима приема. При этом значения относительных амплитуд электрических импульсов на электродах пьезопреобразователя будут такими же, как и в режиме излучения [68].

Следует добавить, что при возбуждении преобразователя электрическими импульсами, например, колокольной формы длительностью $t_{\text{имп}}=l/c$ акустические импульсы, излучаемые преобразователем в нагрузку, будут выглядеть так, как это показано на рис. 16, б штриховой линией, т. е. приобретут «обычную» форму.

Рассматривая рис. 16, а, б, легко заметить, что число импульсов (полуволн), излучаемых в результате воздействия на преобразователь импульса напряжения, может быть сведено до двух, если, как мы видели в параграфе 1, акустический импеданс демпфера будет равен импедансу пьезопреобразователя, т. е. если $K_l=0$. С помощью рис. 16 легко убедиться, что суперпозиция акустических импульсов, аналогичных по форме изображенному на рис. 11 и сдвинутых по фазе на 180° , дает импульс, состоящий из трех полуволн. Форма таких импульсов (см. рис. 12, в, г) не случайна. Два сигнала при $K_l=0$ будут равными по амплитуде и разнополярными. Их число не может быть сокращено до одного, так как для этого необходимо, чтобы $K_l=K_0=-1$, что невозможно на практике, так как при этом z_1 и z_2 должны обратиться в бесконечность.

Полезно отметить тот факт, что первая полуволна колебаний, излучаемых резонансными преобразователями, широко применяемыми в настоящее время в УЗ дефектоскопии, по амплитуде всегда меньше остальных полуволн (как правило, $K_l \neq 0$), и, так как она излучается передней поверхностью преобразователя, ее форма и амплитуда не зависят от свойств демпфера. Влияния на первую полуволну в ближней зоне (зоне Френеля) ультразвукового поля излучения преобразователя также отсутствуют, потому что сферическая волна, возбуждаемая краями преобразователя, распространяется с той же скоростью, что и первая полуволна. Это исключает возможность интерференции с первой полуволной. Поэтому первую полуволну с успехом можно использовать для измерений пьезомодуля преобразователей качества приклейки акустических линз, качества акустического контакта при контактном варианте дефектоскопии и т. п. Последующие полуволны содержат информацию о собствен-

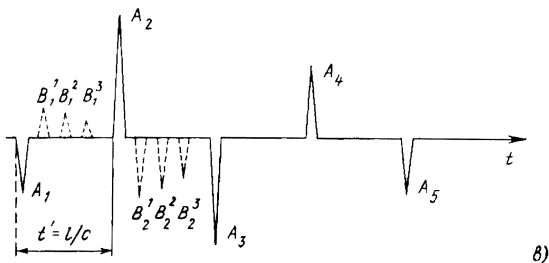
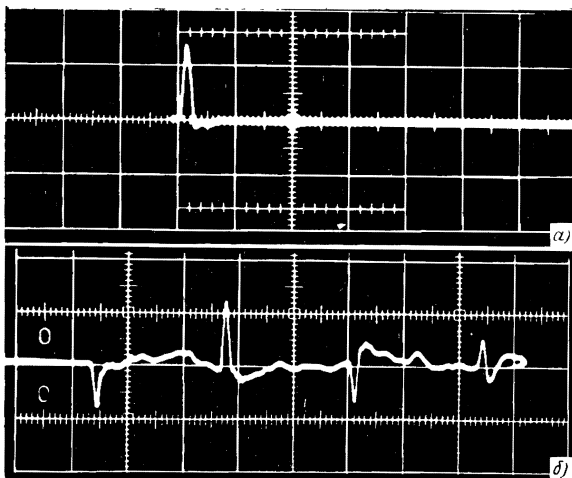


Рис. 17. Осциллограммы импульсов:

а — возбуждающего электрического; б — акустических, излучаемых пьезоэлементом с $l/c > \tau_{\text{имп}}$ (масштаб по горизонтали: а — 0,2 мкс/см; б — 0,25 мкс/см); в — временная диаграмма эхо-импульсов для случая излучения и приема акустических импульсов совмещенным пьезопреобразователем с $l/c > \tau_{\text{имп}}$

ной (резонансной) частоте пьезопреобразователя, о качестве сцепления с демпфером, о степени демпфирования.

Теперь рассмотрим еще один и, видимо, наиболее перспективный из известных способов повышения разрешающей способности ультразвуковой дефектоскопической и измерительной аппаратуры.

При возбуждении достаточно толстых пьезокерамических пластин короткими электрическими импульсами ($\tau_{\text{имп}} \ll l/c$) зависимость смещения металлизированных поверхностей от электрического напряжения в силу линейности пьезоэффекта при малых электрических и механических напряжениях [41] полностью повторяет форму прикладываемых сигналов. Соответственно длительность акустических импульсов, излучаемых каждой из этих поверхностей, зависит только от длительности импульса электрических [24]. Это при определен-

ных условиях, о которых будет сказано ниже, справедливо и для режима приема.

На рис. 17, а, б показаны соответственно электрический и акустический импульсы, излучаемые пьезопреобразователем, представляющим собой цилиндр высотой $l=3$ мм и диаметром 5 мм из пьезокерамики ЦТС-19 (электроды расположены на торцах цилиндра). Прием импульсов осуществляется аналогичным преобразователем. Сказанное выше о соответствии форм возбуждающего и излучаемого импульсов наглядно иллюстрируется этими осциллограммами. При таком способе возбуждения коротких акустических импульсов и при использовании эхо-метода с совмещенным пьезопреобразователем на выходе усилителя в толщиномере появляются серия импульсов $A_1—A_n$ (сплошная линия на рис. 17, в) при нагрузке на полупространство и добавляются импульсы $B_1^1—B_1^i$, $B_2^1—B_2^i$..., ..., $B_n^1—B_n^i$ (штриховая линия на рис. 17, в) при нагрузке пластиной толщиной $d < c_n l / c$, где c_n — скорость УЗ колебаний в материале пластины. Импульсы $B_n^1—B_n^i$ являются следствием многократных отражений импульсов $A_1—A_n$ внутри контролируемого изделия (на рис. 17, в импульсы $B_3^i—B_n^i$ для простоты не показаны). Число импульсов A_n зависит от коэффициента затухания УЗ колебаний в материале пьезоэлемента, от его толщины l и некоторых других факторов. При указанных выше размерах преобразователя из ЦТС-19 число импульсов $n=25÷30$, а длительность всего цуга составляет примерно 10—15 мкс, что позволяет использовать обычные частоты следования зондирующих импульсов (0,1—10 кГц). При помощи следящего временного селектора [38] из серии импульсов, показанных на рис. 17, в, легко выделить только те, которые попадают в интервал времени $t'=l/c$, а затем необходимую информацию, например, о толщине контролируемого изделия извлечь обычными методами [7, 58, 73].

В принципе с помощью толстых пьезоэлементов можно излучать акустические импульсы нано- и пикосекундной длительности. Быстродействие толстых пьезоэлементов принципиально ограничивается только временем установления ионной поляризации в пьезокерамике, которое по оценкам разных авторов [41] лежит в пределах $10^{-10}—10^{-13}$ с. На практике минимальная длительность акустических импульсов, излучаемых толстыми пьезоэлементами, составляет единицы наносекунд [19, 26] и ограничивается чисто техническими возможностями создания электронных схем генераторов наносекундной длительности и чистотой обработки излучающей поверхности пьезоэлемента. При излучающей поверхности с $Ra=0,32$ минимальная длительность акустических импульсов, которую удастся получить с помощью толстых пьезоэлементов, составляет 2—3 нс [19], что соответствует разрешающей способности эхо-импульсных приборов на изделиях из стали и алюминия 5—10 мкм. Для получения более коротких акустических импульсов необходимо иметь пьезоэлементы с оптически чистой излучающей поверхностью.

Еще одна особенность толстых пьезопреобразователей состоит в том, что в режиме приема акустических импульсов при определенных условиях с их электродов можно снимать электрические сигналы, форма и длительность которых с высокой точностью повторяет форму и длительность принимаемых импульсов. При воздействии короткого однополярного акустического импульса на

ненагруженный электрически толстый пьезоэлемент на его электродах появляется разность потенциалов, которая не является коротким импульсом. Это объясняется тем, что разность потенциалов на ненагруженном электрически толстом пьезоэлементе в режиме приема представляет собой интеграл по времени пространственного профиля упругой волны, распространяющейся в его объеме [68]. Таким образом, разность потенциалов, возникающая на электродах толстого пьезоэлемента в результате воздействия на него короткого однополярного акустического импульса и многократных отражений последнего в его объеме,— это скачкообразная функция, только продифференцировав которую можно получить сам профиль волны, т. е. импульсы напряжения или тока, повторяющие по форме акустический импульс, принимаемый пьезоэлементом.

На практике дифференцирование импульсов напряжения, возникающих на пьезопреобразователе в режиме приема, осуществляют подключением параллельно к конденсатору, образуемому его электродами, сопротивления в несколько десятков Ом [67, 68].

В отечественной литературе, число работ, посвященных использованию толстых пьезоэлементов для целей акустических исследований, дефектоскопии и толщинометрии, крайне ограничено. Так, в работах [14, 54] описаны толстые пьезоэлементы, предназначенные для изучения быстро меняющихся давлений в газовой среде (в частности, в ударных трубах для изучения газодинамических процессов). В работе [46] рассматриваются некоторые аспекты теории толстых пьезопреобразователей и нет никаких данных о результатах их практического применения в ультразвуковой аппаратуре с целью повышения ее разрешающей способности. То, что толстые пьезопреобразователи не нашли до сих пор широкого распространения в ультразвуковой дефектоскопической и измерительной аппаратуре, несмотря на то, что они являются в настоящее время практически единственным простым средством излучения и приема ультракоротких акустических импульсов, объясняется, видимо, присущими им недостатками.

К недостаткам толстых пьезопреобразователей можно отнести, во-первых, невозможность излучения с их помощью одиночных акустических импульсов в пределах периода следования возбуждающих электрических импульсов, что крайне ограничивает максимальные глубины «прозвучивания» в УЗ дефектоскопах и соответственно максимальные измеряемые толщины в УЗ эхо-импульсных толщиномерах. Так, у пьезоэлемента из пьезокерамики марки ЦТС-19 толщиной 5 мм максимальный временной интервал между излучаемыми акустическими импульсами составляет 1,4—1,6 мкс. Это соответствует максимальной измеряемой толщине 4,2—4,8 мм для изделий из стали и алюминиевых сплавов. Чрезмерное увеличение толщины пьезоэлемента приводит к резкому уменьшению коэффициента двойного преобразования (на приемопередачу), так как он пропорционален квадрату электрической емкости пьезоэлемента. Во-вторых, импульсы напряжения, снимаемые с толстого пьезоэлемента в режиме приема, приходится дифференцировать, для чего пьезоэлемент шунтируют малым активным сопротивлением. В результате резко падает амплитуда снимаемых с него электрических импульсов. Так, для того чтобы без заметных искажений получать с пьезоэлемента емкостью 100 пФ (типичное значение) импульсы длительностью 25 нс, необходимо подключить сопротивление порядка 10—20 Ом.

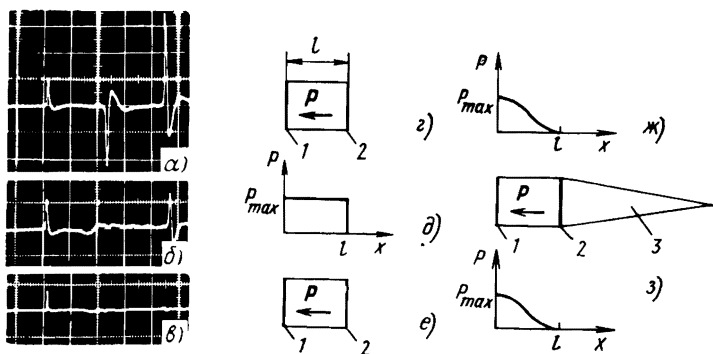


Рис. 18. Эволюция переходных процессов в толстых пьезопреобразователях с различным объемным распределением величины вектора поляризации (δ , ж) и акустической лощушкой на неизлучающей в полезную нагрузку поверхности (з) (масштаб по горизонтали на рис. а , б , в 1 мкс/см)

При этом амплитуды снимаемых сигналов имеют порядок 0,01—0,1 мВ.

Из сказанного следует, что пьезопреобразователи приходится возбуждать импульсами амплитудой до нескольких тысяч вольт [68] и применять высокочувствительные широкополосные усилители напряжения, что, вообще говоря, представляет значительные трудности и в ламповой технике, а для приборов, выполняемых на полупроводниковых элементах, практически неприемлемо.

3. АПЕРИОДИЧЕСКИЕ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Пьезокерамические материалы приобретают пьезосвойства лишь после искусственной поляризации внешним электрическим полем и могут быть вновь частично или полностью деполяризованы при нагревании их до температур, превышающих верхнюю точку Кюри. Это позволяет изменять пьезосвойства материала и открывает возможности для создания пьезопреобразователей с новыми качествами.

На рис. 18, г схематически изображен толстый пьезоэлемент толщиной l с электродом 1 на излучающей поверхности и электродом 2 на тыльной поверхности, не излучающей УЗ колебания в полезную нагрузку. На рис. 18, а , д показаны соответственно серия акустических импульсов, излучаемых пьезоэлементом при его возбуждении короткими однополярными электрическими импульсами, и график изменения величины вектора поляризации P на промежутке между гранями пьезоэлемента, покрытыми электродами 1, 2.

Половина импульсов (нечетные), показанных на рис. 18, а , вызвана первоначальной деформацией (смещением) из-за обратного пьезоэффекта у поверхности пьезоэлемента, на которой расположен электрод 1, а другая половина (четные импульсы) — деформацией у электрода 2. Таким образом, в нагрузку уходит серия чередующихся «разнополярных» импульсов с равными интервалами времени l/c между ними. Форма каждого из этих акустических импульсов,

вообще говоря, должна в точности повторять форму возбуждающего электрического импульса. Это следует из линейности пьезоэффекта в слабых электрических полях. Нелинейные эффекты в пьезоэлектрической керамике начинают проявляться при напряженностях электрического поля $15\text{--}20 \cdot 10^3$ В/см [41], тогда как в ультразвуковой импульсной измерительной и дефектоскопической аппаратуре возбуждающие электрические поля, как правило, не превышают $2\text{--}5 \cdot 10^3$ В/см. Однако из-за того, что все акустические импульсы, кроме первого, из серии, излучаемой пьезопреобразователем, проходят тот или иной путь в его объеме, они, как это хорошо видно из рис. 18, а, искажаются в результате частотно-зависимого затухания УЗ колебаний в материале пьезоэлемента.

Источники механических напряжений или УЗ колебаний в пьезоэлектрических моно- и поликристаллах расположены на тех участках, где имеются градиенты поляризации или напряженности возбуждающего электрического поля [65]. Это подтверждается тем [37], что при возбуждении пьезоэлемента короткими электрическими импульсами механические напряжения (деформации) возникают первоначально лишь у его поверхностей, перпендикулярных вектору поляризации \mathbf{P} (рис. 18, г, е, з), а объем пьезоэлемента остается пассивным, т. е. не проявляет пьезоэффекта и служит только волноводом для УЗ колебаний.

Когда к электродам пьезоэлемента из пьезоэлектрического монокристалла или равномерно по объему поляризованной пьезокерамики прикладываются разность потенциалов, электрическое поле мгновенно (со скоростью распространения электромагнитного поля в диэлектриках) и равномерно распределяется во всем пространстве внутри пьезоэлемента, поэтому в его объеме деформаций не возникает. Градиент поляризации обычно отличен от нуля на гранях пьезоэлемента, несущих электроды, где и возникают импульсы механических напряжений. Учет именно этого обстоятельства позволил разработать пьезопреобразователь нового типа [19] [А.с. 381021 (СССР)].

Из рис. 18, д, где приведен график изменения величины вектора поляризации \mathbf{P} на промежутке между гранями пьезоэлемента, покрытыми электродами 1, 2 (рис. 18, з), видно, что градиент поляризации $\text{grad } \mathbf{P} = d\mathbf{P}/dx = 0$. В обычном, равномерно по объему поляризованном пьезоэlemente $\text{grad } \mathbf{P} = \pm \infty$ у электродов 1 и 2 соответственно.

Был проведен следующий эксперимент [19]. Пьезоэлемент из керамики марки ЦТС-19 в виде цилиндра диаметром 8,5 мм и высотой $l = 10$ мм, поляризованный в направлении, перпендикулярном к серебрянным электродам, нанесенным на основании этого цилиндра (рис. 18, е), деполяризовали таким образом, что степень поляризации плавно убывала от максимума у электрода 1 до нуля у электрода 2, оставаясь при этом примерно одинаковой по всей площади любого из сечений пьезоэлемента, перпендикулярных плоскостям электродов. При этом график изменения \mathbf{P} качественно выглядел так, как это показано на рис. 18, ж, из которого видно, что $\text{grad } \mathbf{P} \neq 0$ практически во всем объеме пьезоэлемента. Однако его величина внутри пьезоэлемента ничтожно мала по сравнению с величиной $\text{grad } \mathbf{P} = \infty$ у поверхности с электродом 1. При этом, как и следовало ожидать, в серии акустических импульсов, излучаемых пьезоэлементом, исчезли четные импульсы и остались только нечет-

ные «положительные» импульсы (рис. 18, б), возникающие вследствие пьезоэффекта у лицевой поверхности 1 пьезоэлемента.

Если первый акустический импульс на рис. 18, б появляется в результате обратного пьезоэффекта одновременно с существованием возбуждающего электрического импульса, то все остальные (на рис. 18, б показан только один из них) являются следствием многократных отражений части энергии этого акустического импульса, ушедшей внутрь пьезоэлемента, между его лицевой 1 и тыльной 2 поверхностью. Появление этих многократных отраженных импульсов в полезной нагрузке (например, в иммерсионной среде) в принципе можно исключить (на практике их удается уменьшить в 100—200 раз), если к тыльной поверхности пьезоэлемента прикрепить тело с большим коэффициентом затухания УЗ колебаний и акустическим импедансом, равным импедансу материала, из которого изготовлен сам пьезоэлемент, или при сохранении последнего условия придать ему форму акустической ловушки, например, в виде конуса [53], как это показано на рис. 18, з. При этом практически вся энергия акустического импульса, распространяющегося внутрь пьезоэлемента, беспрепятственно проходит внутрь акустической ловушки и полностью поглощается ею. Таким образом и исключается появление «лишних» акустических импульсов в полезной нагрузке преобразователя, что наглядно иллюстрируется осциллограммой рис. 18, в.

Ниже будет описана техника деполяризации и результаты экспериментальной проверки и исследования описанного пьезопреобразователя.

Из сказанного выше легко видеть, что предложенный [19] пьезопреобразователь полностью аperiodичен, т. е. не имеет резонансных свойств, и должен на воздействие возбуждающих электрических импульсов произвольной формы отвечать излучением акустических импульсов практически той же формы. В самом деле, в нем нет второй поверхности, отражающей УЗ колебания, которая была бы параллельна поверхности с электродом 1 (рис. 18, з), что исключает возможность возникновения внутри пьезоэлемента стоячей волны, обуславливающей механический резонанс или многократные отражения коротких акустических импульсов в его объеме. Именно поэтому форма акустических импульсов, которые можно излучать с помощью предложенного преобразователя на практике определяется исключительно формой возбуждающих электрических импульсов.

Характеристики описанного пьезопреобразователя зависят от закона изменения степени поляризации в объеме пьезоэлемента.

Частотная характеристика аperiodического пьезопреобразователя рассчитывается следующим образом [37]. Кривая $f(x)$ характеризует закон поляризации (рис. 19, б) преобразователя, схематически показанного на рис. 19, а:

$$\left. \begin{aligned} f(x) &= -\frac{x}{b-a} + \frac{b}{b-a} \quad \text{при } a < x < b; \\ f(x) &= 1 \quad \text{при } 0 < x < a; \\ f(x) &= 0 \quad \text{при } x > b \text{ и } x < 0, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где a — начало спада поляризации; b — конец спада поляризации; x — текущее расстояние (если b меньше толщины пьезопреобразо-

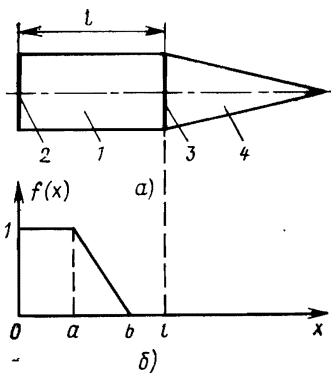


Рис. 19. Толстый аперодический пьезопреобразователь:

a — схема (1 — пьезоэлемент; 2 — электрод на излучающей поверхности; 3 — электрод на тыльной поверхности пьезоэлемента; 4 — акустическая ловушка); *б* — график закона поляризации пьезоэлемента

вателя, это означает, что поляризация убывает до нуля в пределах его объема).

Кривая (3), вообще говоря, является идеализированным представлением закона поляризации, введенным для упрощения дальнейших вычислений. На самом же деле закон поляризации в зависимости от выбранного режима деполяризации может быть произвольным, однако в любом случае характер этого закона с достаточной для практических расчетов точностью описывается кривой (3) [37]. Необходимо лишь правильно выбрать соотношение *a* и *b*. При этом заметим, что толщина пьезоэлемента может быть как больше, так и меньше *b*. В частном случае, когда *a*=0, степень поляризации начинает уменьшаться линейно по толщине непосредственно от передней излучающей поверхности пьезоэлемента.

Если же *a*=*b*, то это означает, что степень его поляризации постоянна по толщине, т. е. пьезоэлемент не подвергался деполяризации (при этом, конечно, толщину пьезоэлемента необходимо полагать равной *b*). Таким образом, любой практический закон поляризации аппроксимируется линейно-ломаной кривой (3).

При равномерной поляризации пьезопластины градиент поляризации, отличный от нуля, имеет место только у ее поверхностей. Это означает, что такая пластина излучает, как уже говорилось, ультразвук, лишь своими поверхностями. В толстом же пьезоэлементе вследствие его частичной деполяризации по закону (3) градиент поляризации образуется не только у передней поверхности пьезоэлемента, но и в его объеме. Это приводит к тому, что толстый, частично деполяризованный пьезоэлемент, в отличие от обычного, излучает ультразвук всем своим объемом.

Для расчета частотной характеристики такого пьезопреобразователя условно разобьем его по толщине на *n* равных частей таким образом, чтобы в каждой *i*-й части градиент поляризации $df(x)/dx$ по толщине был практически постоянным. Если $U_1(t)$ — электрическое напряжение, приложенное к электродам преобразователя, то звуковое давление $U_2(t)$ у лицевой излучающей поверхности преобразователя будет

$$U_2(t) = \sum_{i=0}^n f'(x_i) U_1 \left(t - \frac{x_i}{c} \right) \Delta x_i,$$

где $f'(x)$ — производная от закона поляризации; x_i — координата по толщине *i*-го элементарного участка; *c* — скорость звука в пьезо-

материале. Понятно, что запаздывание по времени на x_i/c обусловлено временем прохождения звуковой волны от i -го элементарного участка до передней поверхности преобразователя. При стремлении n к ∞ получим

$$U_2(t) = \int_0^l f'(x) U_1\left(t - \frac{x}{c}\right) dx, \quad (4)$$

где l — толщина пьезоэлемента. Положим теперь, что электрическое напряжение, приложенное к преобразователю, представляет собой δ -функцию Дирака, т. е. $U_1(t) = \delta(t)$. В этом случае $U_2(t)$ есть ни что иное, как реакция преобразователя на δ -функцию. Если обозначить эту реакцию через $g(t)$, то (4) примет вид

$$g(t) = \int_0^l f'(x) \delta\left(t - \frac{x}{c}\right) dx.$$

Применяя правило интегрирования δ -функций, получим

$$g(t) = f'(ct). \quad (5)$$

Таким образом, реакция частично деполаризованного пьезопреобразователя на δ -функцию определяется только законом его поляризации и пропорциональна первой производной от этого закона. Интеграл (4) представляет собой известный интеграл Дюамеля, с помощью которого по заданному входному воздействию $U_1(t)$ и известной реакции на δ -функцию $g(t)$ можно определить выходное воздействие $U_2(t)$ (в нашем случае — давление у лицевой поверхности преобразователя).

Применяя теперь к (5) преобразование Фурье, получаем выражение для частотной характеристики пьезопреобразователя:

$$\dot{K}(\omega) = \int_0^{l/c} f'(ct) e^{-j\omega t} d\omega, \quad (6)$$

где $\omega = 2\pi F$ — текущая круговая частота; F — линейная частота; j — мнимая единица.

Подставляя (3) в (6) и интегрируя, находим

$$\begin{aligned} \dot{K}(\omega) = & 1 - \frac{2c}{(b-a)\omega} \sin \frac{\omega(b-a)}{2c} \cos \frac{\omega(b+a)}{2c} - \\ & - j \frac{2c}{(b-a)\omega} \sin \frac{\omega(b+a)}{2c} \sin \frac{\omega(b-a)}{2c}. \end{aligned} \quad (7)$$

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) преобразователя определится теперь как модуль комплексного числа $K(\omega)$, т. е.

$$\begin{aligned} K(\omega) = & |\dot{K}(\omega)| = \\ = & \sqrt{\left[1 - \frac{2c}{(b-a)\omega} \sin \frac{\omega(b-a)}{2c} \cos \frac{\omega(b+a)}{2c}\right]^2 + \\ & + \frac{4c^2}{(b-a)^2 \omega^2} \sin^2 \frac{\omega(b+a)}{2c} \sin^2 \frac{\omega(b-a)}{2c}}. \end{aligned} \quad (8)$$

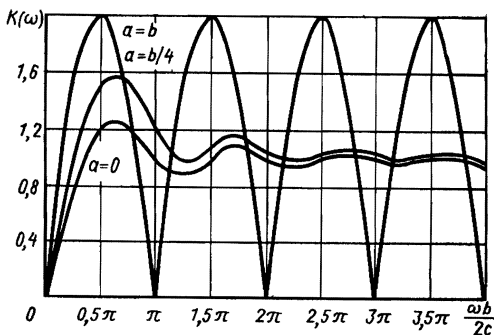


Рис. 20. Амплитудно-частотные характеристики преобразователя

В частном случае, когда $a=0$, (8) примет вид

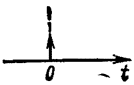
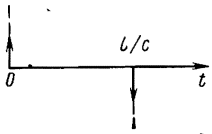
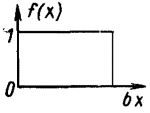
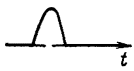
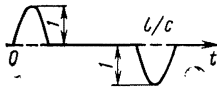
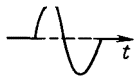
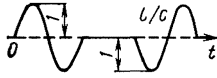
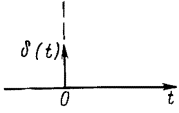
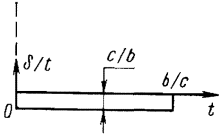
$$K(\omega) = \sqrt{1 - \frac{2c}{\omega b} \sin \frac{\omega b}{c} + \frac{4c^2}{\omega^2 b^2} \sin^2 \frac{\omega b}{2c}}. \quad (9)$$

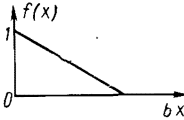
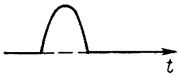
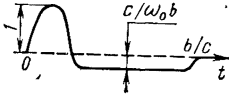
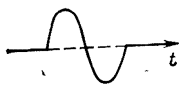
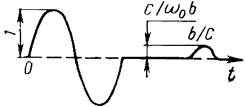
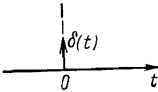
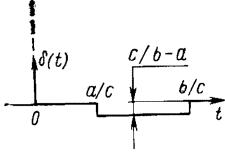

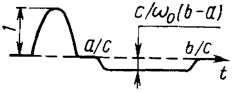
В другом частном случае, когда $a=b$,

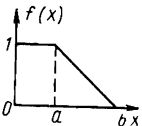
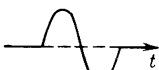
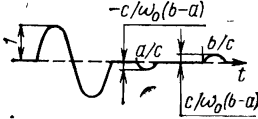
$$K(\omega) = 2 \left| \sin \frac{\omega b}{2c} \right|. \quad (10)$$

Кривые (8), построенные для различных a , показаны на рис. 20. Из этого рисунка видно, что наличие градиента поляризации в объеме пьезоэлемента приводит к подавлению низких частот и к наличию некоторой колебательности в низкочастотной части АЧХ. Кроме того, в случае, когда $a=b$, наличие излучающей задней поверхности пьезоэлемента приводит к появлению на АЧХ областей с нулевым излучением. Это объясняется тем, что при одновременном излучении звука обеими поверхностями всегда найдутся частоты, при которых фазы излучаемых этими поверхностями волн будут противоположны. Амплитуда колебаний в этом случае будет равна нулю, что и иллюстрируется кривой для $a=b$, приведенной на рис. 20. В остальных случаях подавление низких частот и колебательность АЧХ в области низких частот приведут к некоторым искажениям формы акустического импульса, излучаемого преобразователем, по сравнению с формой возбуждающего электрического импульса.

Для определения этих искажений можно воспользоваться выражением (4) для случаев, когда входное воздействие равно одной полуволне синусоиды с частотой ω_0 , а также когда оно равно одной волне синусоиды с частотой ω_0 . При этом второй случай можно рассматривать как суперпозицию реакций преобразователя на две полуволны противоположной полярности, сдвинутые во времени на величину π/ω_0 . Результаты этих расчетов для различных законов поляризации сведены в табл. 1. Из этой таблицы хорошо видно, что выходной сигнал $U_2(t)$ тем меньше искажается по сравнению с входным, чем меньше его длительность по сравнению с временем $(b-a)/c$. Если отношение этих времен достаточно мало, то выходной сигнал практически не отличается по форме от входного, т. е.

$f(x)$	$U_1(t)$	$U_2(t)$
$f(x) = 1$ при $0 < x < l$ $f(x) = 0$ при $x > l,$ $x < 0$		 $\delta(t) - \delta\left(t - \frac{l}{c}\right)$
	 $U_1(t) = \sin \omega_0 t,$ $0 < \omega_0 t < \pi$ $U_1(t) = 0,$ $0 > \omega_0 t > \pi$	 $\sin \omega_0 t - \sin \omega_0 \left(t - \frac{l}{c}\right)$
$a = b = l$	 $U_1(t) = \sin \omega_0 t,$ $0 < \omega_0 t < 2\pi$ $U_1(t) = 0,$ $0 > \omega_0 t > 2\pi$	 $\sin \omega_0 t - \sin \omega_0 \left(t - \frac{l}{c}\right)$
$f(x) = -\frac{x}{b} + 1$ при $0 < x < b$		 $\delta(t) - \frac{c}{b}$

$f(x)$	$U_1(t)$	$U_2(t)$
$f(x) = 0$ при $x > b,$ $x < 0$ 	 $U_1(t) = \sin \omega_0 t,$ $0 \leq \omega_0 t \leq \pi$ $U_1(t) \equiv 0,$ $0 > \omega_0 t > \pi$	 $\sin \omega_0 t + \frac{c}{\omega_0 b} \cos \omega_0 t -$ $-\frac{c}{\omega_0 b} \cos \left[\omega_0 \left(t - \frac{b}{c} \right) \right]$
$a = 0$	 $U_1(t) = \sin \omega_0 t,$ $0 \leq \omega_0 t \leq 2\pi$ $U_1(t) \equiv 0,$ $0 > \omega_0 t > 2\pi$	 $\sin \omega_0 t + \frac{c}{\omega_0 b} \cos \omega_0 t -$ $-\frac{c}{\omega_0 b} \cos \left[\omega_0 \left(t - \frac{b}{c} \right) \right]$
$f(x) = -\frac{x}{b-a} - \frac{b}{b-a}$ при $a < x < b$ $f(x) = 1$ при $0 \leq x < a$	 $\delta(t)$	 $\delta(t) - \frac{c}{b-a}$
$f(x) = 0$ при $x > b,$ $x < 0$	 $U_1(t) = \sin \omega_0 t,$ $0 \leq \omega_0 t \leq \pi$ $U_1(t) \equiv 0,$ $0 > \omega_0 t > \pi$	 $\sin \omega_0 t + \frac{c}{\omega_0 (b-a)} \cos \omega_0 t \times$ $\times \left(t - \frac{a}{c} \right) - \frac{c}{\omega_0 (b-a)} \times$ $\times \cos \omega_0 \left(t - \frac{b}{c} \right)$

$f(x)$	$U_2(t)$	U_2
	 $U_1(t) = \sin \omega_0 t,$ $0 < \omega_0 t < 2\pi$ $U_1(t) \equiv 0,$ $0 > \omega_0 t > 2\pi$	 $\sin \omega_0 t + \frac{c}{\omega_0 (b-a)} \times$ $\times \cos \omega_0 (t - a) -$ $- \frac{c}{\omega_0 (b-a)} \cos \omega_0 \left(t - \frac{b}{c} \right)$

пьезопреобразователь становится практически полностью аperiodическим, что будет наглядно проиллюстрировано ниже. Однако за счет отрицательного градиента поляризации, который имеет место в объеме пьезоэлемента, появляются нежелательные, сравнительно низкочастотные выбросы. Амплитуда этих выбросов (акустической помехи) оказывается во столько раз меньше амплитуды основного сигнала, во сколько раз его длительность меньше времени $(b-a)/c$. Это соотношение на практике, как правило, оказывается вполне достаточным для того, чтобы величиной нежелательных выбросов можно было пренебречь.

Так, при возбуждении преобразователя с пьезоэлементом из керамики марки ЦТС-19 ($c=3,3 \cdot 10^3$ м/с) толщиной $l=10$ мм при $a=0$ и $b=l$ электрическими импульсами в виде волны синусоиды частотой $F=\omega_0/2\pi=20$ МГц отношение полезный сигнал — помеха равно примерно 380. Такое соотношение сигнал—помеха достаточно для применения описанного пьезопреобразователя не только в эхо-импульсных толщиномерам, но и в весьма чувствительных дефектоскопах с динамическим диапазоном более 350.

Выражения (4) и (8) представляют собой соответственно переходную и амплитудно-частотную характеристики преобразователя в режиме излучения акустических колебаний. Если учесть, что при приеме импульсов УЗ колебаний амплитуды импульсов тока, протекающего через пьезоэлемент с коротко замкнутыми электродами, пропорциональны градиенту вектора поляризации вдоль направления распространения акустических импульсов в объеме пьезоэлемента [65, 68], то нетрудно показать путем таких же рассуждений, какие были использованы при выводе выражений (4), (8), что переходная и частотная характеристики предложенного пьезопреобразователя и в режиме приема описываются теми же выражениями. При этом $U_1(t)$ представляет собой акустическое давление у лицевой поверхности преобразователя, а $U_2(t)$ — ток в цепи его коротко замкнутых электродов.

Формулы (4)—(10) и выражения в табл. 1 даны с точностью до констант, учитывающих пьезоэлектрические и акустические свойства пьезоэлементов и амплитуды сигналов.

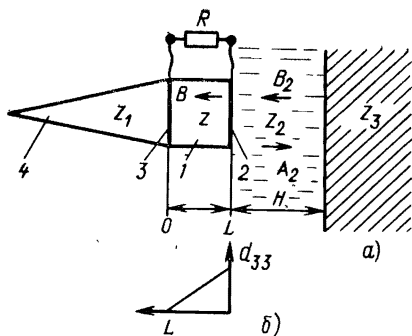


Рис. 21. К расчету коэффициента преобразования:

а — схема совмещенного апериодического пьезопреобразователя; б — график изменения величины пьезомодуля d_{33} в объеме пьезоэлемента

Для практических расчетов электронных блоков ультразвуковых приборов, в которых применяется предложенный апериодический пьезопреобразователь, необходимо знать коэффициент его двойного преобразования электрической энергии возбуждающего генератора в акустическую в режиме излучения и обратно в режиме приема. Другими словами, необходимо рассчитывать величину тока в цепи электрической нагрузки преобразователя в режиме приема УЗ колебаний, если задана величина возбуждающего электрического напряжения генератора в режиме излучения.

Проведем расчет [36] на примере иммерсионного варианта эхо-метода для совмещенного преобразователя. Как будет показано ниже, полученные результаты легко обобщить и для контактного варианта эхо-метода.

На рис. 21, а схематично показан пьезопреобразователь, состоящий из толстого, частично деполяризованного пьезоэлемента 1 с акустическим сопротивлением z и акустической ловушки 4 с акустическим сопротивлением $z_1 = z$. Излучающей поверхностью с электродом 2 преобразователь граничит с иммерсионной жидкостью (акустическое сопротивление z_2), через которую УЗ колебания попадают на отражающее «полупространство» (контролируемое изделие) с акустическим импедансом z_3 . На рис. 21, б показан график изменения в объеме пьезоэлемента пьезомодуля d_{33} пропорционального, как известно [41], модулю вектора поляризации.

Преобразование электрической энергии в механическую при излучении УЗ колебаний и механической в электрическую при их приеме в преобразователе такой конструкции происходит, как мы видели, практически только на лицевой поверхности у электрода 2, где $\text{grad } d_{33} = \infty$. В случае приема форма импульса тока, снимаемого с преобразователя, в точности повторяет форму импульса акустического давления, падающего на его лицевую поверхность, если преобразователь работает в режиме короткого замыкания [67, 68] (под режимом короткого замыкания здесь и далее понимается такой режим, при котором сопротивление нагрузки настолько мало, что постоянная времени выходной цепи преобразователя много меньше длительности принимаемых ультразвуковых импульсов).

Известная методика расчета переходных процессов в пьезопреобразователях [67] позволяет определить импульс тока $I(t)$, протекающего через сопротивление нагрузки пьезоэлемента R , в режиме приема. По этой методике преобразование Лапласа применяют к

волновому уравнению, граничным условиям и уравнениям пьезоэффекта.

Очевидно, что для пьезопреобразователя, рассмотренного выше, достаточно учесть граничное условие только на лицевой поверхности у электрода 2, излучающей и принимающей УЗ колебания. Имеем исходные уравнения:

$$\bar{A}_2 \exp\left(-p \frac{L}{c_2}\right) + \bar{B}_2 \exp\left(p \frac{L}{c_2}\right) = \bar{B} \exp\left(p \frac{L}{c}\right); \quad (11)$$

$$\begin{aligned} pz_2 \left[\bar{A}_2 \exp\left(-p \frac{L}{c_2}\right) + \bar{B}_2 \exp\left(p \frac{L}{c_2}\right) \right] = \\ = pz \left[\bar{B} \exp\left(p \frac{L}{c}\right) \right] - h_{33} \frac{q}{S}; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\bar{U} = -h_{33} \left[\bar{B} \exp\left(p \frac{L}{c}\right) - \bar{B} \right] + \frac{\bar{q}}{C_0}; \quad (13)$$

$$\bar{U} = \bar{I}R = -p\bar{q}R'. \quad (14)$$

Здесь p — оператор Лапласа. Черта над символами указывает на преобразование величины по Лапласу. Уравнения (11) и (12) означают соответственно равенство механических смещений и напряжений на лицевой поверхности преобразователя. Постоянные A_2 , B_2 и B — амплитуды волн, определяемые из граничных условий. Уравнение (13) — уравнение прямого пьезоэффекта, где U — разность потенциалов, развиваемая преобразователем; q — величина заряда на его электродах; C_0 — физическая емкость преобразователя; S — площадь его электродов; z — акустическое сопротивление материала, из которого изготовлен преобразователь, равное произведению его плотности ρ на скорость c распространения в нем продольных УЗ колебаний; z_2 — акустическое сопротивление нагрузки (например, воды), равное произведению ее плотности ρ_2 на скорость c_2 УЗ колебаний; h_{33} — пьезоэлектрическая константа материала, из которого изготовлен пьезоэлемент.

Уравнение (14) — закон Ома для внешней электрической нагрузки R преобразователя.

Уравнения (11)–(14) позволяют найти величину импульса тока

$$I = \frac{2z_2 h_{33} \bar{\xi}_{B_2}(L) p \left[1 - \exp\left(-p \frac{L}{c}\right) \right]}{\frac{h_{33}^2}{S} \left[\frac{1 - \exp\left(-p \frac{L}{c}\right)}{p} \right] - (z+z_2) \left(pR + \frac{1}{C_0} \right)}, \quad (15)$$

где $\bar{\xi}_{B_2}(L) = \bar{B}_2 \exp\left(p \frac{L}{c_2}\right) -$ механическое смещение у лицевой поверхности преобразователя.

Пренебрегая в знаменателе (15) первым членом (что справедливо при $RC_0 \rightarrow 0$), описывающим вторичный обратный пьезоэффект, имеем

Пренебрегая в знаменателе (15) первым членом (что справедливо при $RC_0 \rightarrow 0$), описывающим вторичный обратный пьезоэффект, имеем

$$\bar{I} = \frac{2z_2 h_{33} \xi_{B_2}(L)}{(z + z_2)} \left[\frac{\rho}{\rho R + 1/C_0} - \frac{\rho \exp\left(-\rho \frac{L}{c}\right)}{\rho R + 1/C_0} \right]. \quad (16)$$

Как уже говорилось, для предложенного преобразователя практически всегда справедливо неравенство $T \ll L/c$ (T — длительность импульса УЗ колебаний, принимаемого преобразователем). Учитывая это неравенство, легко показать, что при переходе от изображения к оригиналу интеграл обращения второго слагаемого в (16) будет равен нулю для любого $t > 0$, поскольку пьезомодуль d_{33} у электрода 3 на тыльной стороне преобразователя равен нулю и отсутствует вторая отражающая УЗ колебания граница у электрода 3 (рис. 21, а, б).

Переходя от смещения $\bar{\xi}_{B_2}(L)$ к давлению $\bar{p}_{B_2}(L)$, получим окончательно

$$\bar{I} = - \frac{2h_{33}C_0}{z + z_2} \frac{\bar{p}_{B_2}(L)}{\rho RC_0 + 1}. \quad (17)$$

В режиме излучения толстого пьезопреобразователя, поляризованного равномерно по всему объему, получено выражение для амплитуды давления в излученной волне [68]:

$$\bar{p}(L) = \frac{z_2}{S(z + z_2)} h_{33} C_0 \bar{U}_r, \quad (18)$$

где U_r — импульс электрического напряжения, возбуждающего преобразователь генератора. Для пьезопреобразователя, рассмотренного в [68], выражение (18) справедливо только при $0 < t < L/c$, для нашего преобразователя — справедливо при любом $t > 0$.

Величины $\bar{p}_{B_2}(L)$ и $\bar{p}(L)$ (давление в падающей и излученной волнах соответственно) без учета расхождения пучка УЗ колебаний, например, при малом расстоянии между преобразователем и отражателем связаны соотношением

$$\bar{p}_{B_2}(L) = \bar{p}(L) K_{23} \exp(-2\alpha H), \quad (19)$$

где $K_{23} = \frac{z_3 - z_2}{z_3 + z_2}$ — коэффициент отражения по давлению на границе раздела иммерсионной жидкости с акустическим сопротивлением z_2 и отражающего полупространства с акустическим сопротивлением z_3 ; α — коэффициент затухания УЗ колебаний в иммерсионной жидкости; H — расстояние между преобразователем и отражателем (см. рис. 21, а).

Подстановка (19) в (17) с учетом (18) дает

$$\bar{I} = \frac{2(h_{33}C_0)^2 K_{23} z_2 \exp(-2\alpha H)}{S(z + z_2)^2} \frac{U_r}{\rho RC_0 + 1}. \quad (20)$$

Из (20) видно, что при коротком замыкании электродов преобразователя в режиме приема ($R=0$) импульс тока в его цепи по форме аналогичен импульсу напряжения, снимаемого с генератора, возбуждающего преобразователь, т. е.

$$I(t) = GU_r(t), \quad (21)$$

где $G = \text{const} = 2(h_{33}C_0)^2 z_2 K_{23} \exp(-2\alpha H) / S(z_1 + z_2)^2$.

В случае произвольного R переход от \bar{I} к $I(t)$ осуществляется сверткой

$$I(t) = G \frac{1}{RC_0} \int_0^t U_{\Gamma}(y) \exp\left(-\frac{t-y}{RC_0}\right) dy. \quad (22)$$

Так, если в качестве возбуждающего электрического сигнала используется импульс напряжения в виде одного периода синусоидальных колебаний, т. е.

$$U_{\Gamma}(t) \begin{cases} U_0 \sin \omega t, & 0 < t < \frac{2\pi}{\omega}; \\ 0, & t > \frac{2\pi}{\omega}, \end{cases}$$

где U_0 — амплитуда импульса генератора, то, подставив значение $U_{\Gamma}(t)$ в (22) и интегрируя, получаем

$$I(t) = G \frac{U_0}{\sqrt{1 + \text{tg}^2 \varphi}} \left[\sin(\omega t - \varphi) + \sin \varphi e^{-\frac{t\omega}{\text{tg} \varphi}} \right],$$

где $\text{tg} \varphi = \omega RC_0$.

Амплитудное значение тока при $t = \pi/2\omega$.

$$I_m = G \frac{U_0}{\sqrt{1 + \text{tg}^2 \varphi}} \left(\cos \varphi + \sin \varphi e^{-\frac{\pi}{2 \text{tg} \varphi}} \right).$$

В эксперименте, который будет описан ниже, преобразователь возбуждался импульсом в виде одного периода синусоиды частотой 20 МГц; $R=10$ Ом и легко может быть сделано еще меньшим; $C_0=90$ пФ, что соответствует $\text{tg} \varphi=0,113$. При этом

$$I_m = G \cdot 0,987U_0. \quad (23)$$

Таким образом, практически осуществлен режим короткого замыкания, при котором, согласно (21), импульс тока в нагрузке преобразователя в режиме приема аналогичен по форме импульсу напряжения, возбуждающего преобразователь, в режиме излучения (коэффициент подобия равен G).

Запишем в окончательном виде выражение для расчета амплитуды импульса тока на входе усилителя в приемно-передающем тракте эхо-импульсного иммерсионного толщиномера:

$$I_m = \frac{2(h_{33}C_0)^2 \cdot z_2}{S(z_1 + z_2)^2} K_{23} e^{-2\alpha H} 0,987U_0. \quad (24)$$

Как правило, в паспортах на пьезоэлементы, выпускаемые промышленностью, дается величина пьезомодуля d_{33} , а не пьезоэлектрической константы $h_{33} = d_{33} E^{\infty} / \epsilon \epsilon_0$, где E^{∞} — динамический модуль Юнга пьезокерамики; ϵ — ее относительная диэлектрическая проницаемость; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная. Если при этом учесть, что (как будет показано ниже) режим работы пьезо-

элемента при приеме УЗ колебаний, практически полностью соответствующий короткому замыканию, легко получить на практике, то выражение (24) можно записать в виде, наиболее подходящем для инженерных расчетов приемно-передающего тракта ультразвуковых импульсных приборов:

$$I_m = \left(\frac{d_{33} E^{ю}}{\varepsilon \varepsilon_0} \right)^2 \frac{2C_0 z_2}{S(z+z_2)^2} K_{23} e^{-2\alpha H} U_0 = D U_0. \quad (25)$$

Полезно отметить, что выражение (25) справедливо для определения тока, отдаваемого преобразователем в режиме приема, и в контактном варианте эхо-метода. Так, для контактного совмещенного преобразователя с твердотельной УЗ линией задержки между пьезоэлементом и контролируемым изделием выражение (25) имеет вид

$$I_m = \gamma D U_0, \quad (26)$$

где γ — эмпирический коэффициент, учитывающий наряду с второстепенными факторами влияние контактной смазки, длительность (частоту заполнения) зондирующего импульса и чистоту поверхности контролируемого изделия. В принципе коэффициент прозрачности γ можно рассчитать [61], однако точность этих расчетов не превышает 50%, и на практике его определяют экспериментально для конкретных условий контроля. Так, для трансформаторного масла, используемого в качестве контактной смазки, при поверхности контролируемого изделия с $Ra=2,5 \div 1,25$ длительности зондирующего импульса в виде одного периода синусоидальных колебаний частотой 20 МГц и УЗ линии задержки из магниевых сплавов типа МА17 коэффициент γ составляет 0,66 и 0,44 для изделий из стали и алюминиевых сплавов соответственно.

В качестве примера отметим, что контактный вариант аperiodического преобразователя, описываемого ниже (см рис. 41, 44), генерирует эхо-импульсы тока амплитудой 150—200 мкА, отраженные от стальной пластины толщиной 5 мм при ее поверхности с $Rz=20$ и длительности импульсов 60 нс. Это соответствует амплитуде напряжения 1—2 В на резисторе сопротивлением 10 кОм без какого-либо усиления.

Разработка практических конструкций аperiodических пьезопреобразователей связана с решением двух технических задач: частичной деполяризацией толстых пьезоэлементов и сцеплением последних с акустической ловушкой.

Суть разработанного метода частичной деполяризации керамических пьезоэлементов [19, 26] состоит в следующем. Поляризованный в направлении по нормали к посеребренным основаниям цилиндр из пьезокерамики 2 вставляют в проволочную державку 1 (рис. 22) и с ее помощью вносят в узкую (диаметром 3—4 мм) струю пламени 3 газовой горелки 4. В течение 5—7 с равномерно по площади любого сечения, параллельного основаниям пьезоэлемента, ту часть объема пьезоэлемента, которая непосредственно прилегает к одному из электродов, нагревают до 500—600 °С на глубину, равную примерно 0,3—0,4 его толщины. Температура верхней точки Кюри (точки располяризации) для пьезокерамики цирконата титана свинца лежит в пределах 280—400 °С [6, 52].

Затем пьезоэлемент немедленно или спустя 3—5 с опускают в ванну с трансформаторным маслом комнатной температуры. При

этом происходит «закалка» пьезоэлемента [6, 52] или фиксация распределения степени поляризации по его объему, полученного в результате локального нагрева выше верхней точки Кюри, т. е. частичной по объему его деполяризации. Уже через несколько минут после охлаждения в ванне с маслом пьезоэлемент пригоден для дальнейшей обработки.

Следует отметить, что при резком охлаждении в ванне с маслом пьезоэлементы из керамики марок ЦТС-22, ЦТС-23 и ЦТС-24 часто растрескиваются, тогда как пьезоэлементы из керамики ЦТС-19 диаметром 8 мм и высотой 5—10 мм растрескиваются крайне редко (примерно один элемент из двухсот), что было

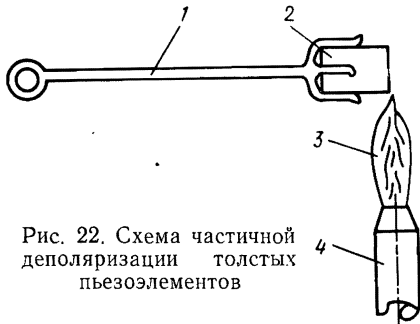


Рис. 22. Схема частичной деполяризации толстых пьезоэлементов

проверено при отработке описанного метода частичной деполяризации на 1,5 тыс. пьезоэлементов (отчасти и по этой причине во всех исследованиях и практических разработках в аperiodических пьезопреобразователях применяют пьезокерамику марки ЦТС-19).

Временной интервал между окончанием нагрева и резким охлаждением пьезоэлемента влияет на плавность изменения степени поляризации в его объеме. Переход величины вектора поляризации от максимума у одного электрода до нуля у другого оказывается более плавным при увеличении этого интервала времени, который, однако, не должен превышать 5—10 с (для пьезоэлементов с линейными размерами 5—15 мм), ибо в противном случае пьезоэлемент в зависимости от его размеров частично или полностью деполяризуется по всему объему.

Выше было показано, что аperiodический пьезопреобразователь состоит из собственно пьезоэлемента, часть 2 которого (рис. 23, а), прилегающая к электроду 1 на излучающей поверхности, поляризована по нормали к этой поверхности, а часть 3, прилегающая к электроду 4, деполяризована у акустической ловушки 5, выполненной из материала с акустическим импедансом, близким или равным импедансу пьезокерамики, из которой изготовлен пьезоэлемент. Наиболее доступной и пригодной в качестве материала для акустической ловушки к пьезоэлементам из керамики ЦТС-19 с акустическим импедансом $36,5 \cdot 10^6$ кг/м²·с оказалась латунь марки ЛС59-1, акустический импеданс которой $36,1 \cdot 10^6$ кг/м²·с.

Поверхности электрода 4 на пьезоэлементе и основание конуса акустической ловушки обрабатываются на притирочной плите до $Ra=0,32 \div 0,63$ и обслуживаются сплавом Вуда. Затем пьезоэлемент и акустическую ловушку в специальной резиновой оправке зажимают в тиски, создавая давление порядка $(3 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^5)$ Па, и помещают в сушильный шкаф. При температуре 65—70 °С пьезоэлемент и акустическая ловушка надежно спаиваются, а излишки расплавленного сплава Вуда и воздушные пузыри выдавливаются и уходят на периферию спаиваемых поверхностей. Для повышения механической прочности соединения пьезоэлемента с конусом место спая по периметру электрода 4 заливают эпоксидной смолой ЭД-5 так, как это показано на рис. 23, а штриховой линией.

Практическая конструкция иммерсионного варианта аperiodического пьезопреобразователя [19] показана на рис. 24. Он состоит из латунного корпуса 4, ввинчивающегося с уплотнением 2 в герме-

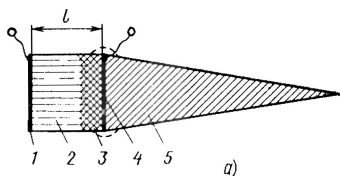
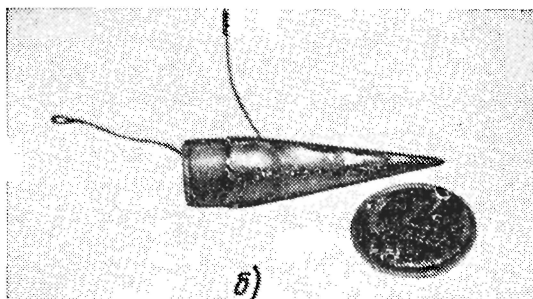


Рис. 23. Деполяризованный толстый пьезоэлемент с акустической ловушкой:

а — схема; б — общий вид



тичный разъем (на рис. 24 не показан), из которого выведен короткий коаксиальный кабель, связывающий преобразователь с прибором. В дне корпуса имеется круглое отверстие, в которое вставлен пьезоэлемент 7 с припаянным к нему латунным конусом 6. К корпусу по контуру отверстия благодаря наличию возжженного серебрянного электрода пьезоэлемент припаявается сплавом Вуда 8. К вершине конуса 6 посредством медного проводника 3 припаявается контактное гнездо 1, которое при помощи специальной оправки выставляется точно по центру корпуса 4.

После этого почти вся полость внутри корпуса заливается эпоксидной смолой 5 так, как это показано на рис. 24. Нижний по рис. 24 электрод на излучающей поверхности преобразователя в целях герметизации и защиты его от коррозии покрывается тонким слоем водостойкого лака АС-82.

Контактный вариант совмещенного аperiodического пьезопреобразователя показан на рис. 25. От иммерсионного преобразователя он отличается только тем, что излучающая поверхность пьезоэлемента 2 граничит с внешней средой, например с контролируемым изделием, не непосредственно, а через УЗ линию задержки 1, выполненную из какого-либо материала, хорошо проводящего высокочастотные ультразвуковые колебания (например, из магнийалюминиевого сплава). Конструктивной особенностью этого преобразователя является то, что с нижней поверхности пьезоэлемента удаляется серебрянный электрод. Эта поверхность и верхняя поверхность

линии задержки обрабатываются до $Ra=0,32$ и склеиваются под давлением ($10 \cdot 10^5$ — $15 \cdot 10^5$) Па эпоксидной смолой ЭД-5. Только после этого сборка линия задержки — пьезоэлемент — акустическая ловушка ввинчивается в корпус 5. Электродом на излучающей поверхности пьезоэлемента служит сама линия задержки.

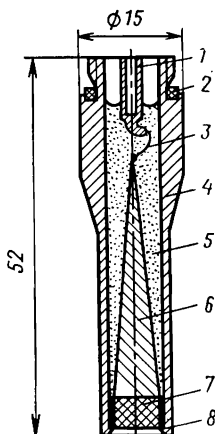
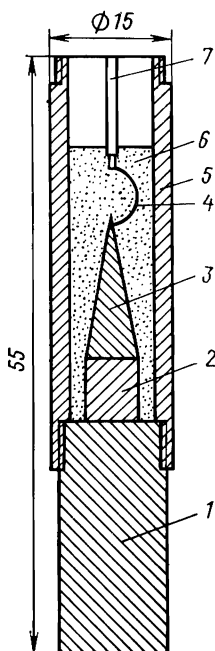


Рис. 24. Иммерсионный аperiodический преобразователь

Рис. 25. Контактный вариант аperiodического пьезопреобразователя:

1 — УЗ линия задержки;
 2 — пьезоэлемент; 3 — акустическая ловушка;
 4 — проводник; 5 — корпус;
 6 — смола ЭД-5;
 7 — контактное гнездо



Выше мы видели, что от полученного закона поляризации в значительной степени зависят характеристики преобразователя. Поэтому определение полученного закона поляризации имеет большое практическое значение при отработке технологии деполяризации пьезоэлементов и особенно для выходного контроля качества преобразователей при их серийном производстве.

Существует простой способ [30] [А. с. 489270 (СССР)] определения закона поляризации пьезоэлементов, полученного, в частности, описанным выше методом. Идея этого способа вытекает из выражения (5), из которого следует, что форма акустического сигнала, излучаемого толстым пьезоэлементом, возбуждаемым коротким электрическим импульсом (в пределе импульсом в виде δ -функции), определяется практически только законом его поляризации и представляет собой первую производную от этого закона (см. табл. 1). Таким образом, интегрируя акустический сигнал, излучаемый преобразователем, можно непосредственно получить искомый закон поляризации пьезоэлемента.

На рис. 26, *a* показана осциллограмма акустического импульса, излучаемого толстым пьезоэлементом. Третья часть объема пьезоэлемента при деполяризации была резко (за 2—2,5 с) нагрета примерно до $+600^{\circ}\text{C}$ и без выдержки на воздухе также резко охлаждена в проточной воде до температуры $+10\div 15^{\circ}\text{C}$. При этом ожи-

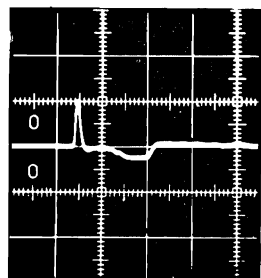


Рис. 26. Иллюстрация способа определения закона поляризации пьезоэлемента:

a — форма излучаемых им акустических импульсов; *б* — график поляризации (масштаб по оси времени на осциллограмме 1 мкс/см)

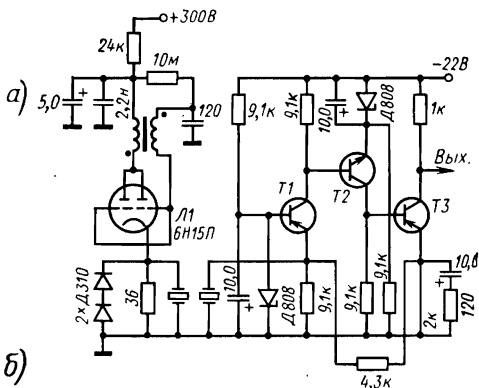


Рис. 27. Принципиальная схема иммерсионной установки для исследования толстых пьезоэлементов (T_1 , T_3 — 1Т313Б; T_2 — 1Т311Д)

далось, что в объеме пьезоэлемента образуется сравнительно мало протяженный участок с большим градиентом вектора поляризации, т. е. в выражении (3) должно было резко отразиться условие $a > 0$, $a < b < l$. Это должно было привести к появлению наряду с положительным акустическим импульсом, излучаемым пьезоэлементом, значительного по амплитуде импульса акустической помехи (см. табл. 1) противоположной полярности. Сказанное подтверждается экспериментально [37] и наглядно иллюстрируется рис. 26, *a*.

Осциллограмма, представленная на рис. 26, *a*, получена на экспериментальной установке, принципиальная схема которой показана на рис. 27. Установка состоит из блокинг-генератора, собранного на лампе Л1, ванночки для иммерсионной жидкости с приклеенными к ней керизиню один против другого исследуемыми пьезоэлементами, а также усилителя импульсов тока T_1 — T_3 с малым (3—5 Ом) входным сопротивлением. Перед обоими пьезоэлементами на стенках ванночки имеются отверстия диаметром 7 мм.

Пьезоэлемент, с которого был получен акустический импульс (см. рис. 26, *a*), имел толщину $l=10$ мм, диаметр 8,5 мм. Прием излучаемых акустических импульсов осуществлялся недеполяризованным пьезоэлементом толщиной $l=31$ мм, значительно большей толщины исследуемого пьезоэлемента, что позволило исключить наложения на электрические импульсы тока, возникающие в приемном

пьезоэлементе вследствие воздействия на него принимаемых акустических импульсов, импульсов тока от многократных отражений этих акустических импульсов в его объеме.

Блокинг-генератор (рис. 27) генерировал импульсы напряжения длительностью 0,25 мкс и амплитудой 70 В.

Частотные характеристики апериодических преобразователей проверялись экспериментально на той же установке. При этом два одинаковых иммерсионных апериодических преобразователя без корпусов также приклеивались к стенкам ванночки один против другого. Излучающий преобразователь возбуждали генератором электрических радиоимпульсов, а приемный подключали на вход того же усилителя тока (рис. 27).

Полоса пропускания усилителя, измеренная прибором на уровне 0,95, составила 0,2—60 МГц.

Генератор радиоимпульсов (рис. 28) в принципе аналогичен описанному в [23, 27]. С него снимались радиоимпульсы амплитудой 50—60 В, длительностью 2—4 мкс и частотой заполнения от 0,5 до 60 МГц. Длительность радиоимпульсов на выходе генератора регулировалась изменением длительности запускающего прямоугольного импульса. Частота заполнения изменялась подстройкой колебатель-

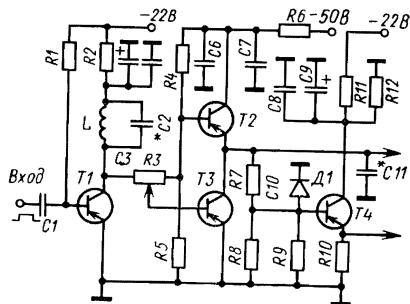


Рис. 28. Принципиальная схема генератора радиоимпульсов ($T1, T4$ — КТ343Г; $T2$ — КТ909Б; $T3$ — КТ626А; $D1$ — КД503А)

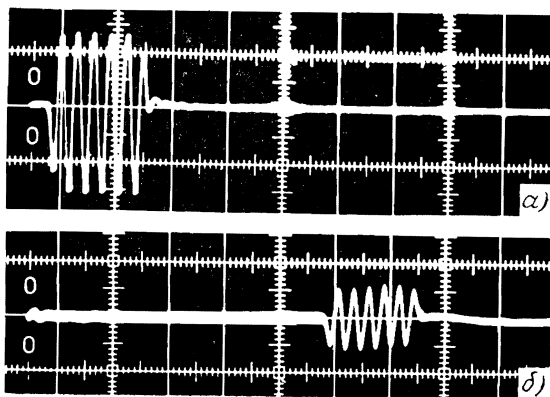


Рис. 29. Осциллограммы радиоимпульсов: а — возбуждающего электрического; б — акустического излучаемого преобразователем [масштаб по оси времени 0,25 мкс/см, масштаб по вертикали 20 В/см (а) и 1 В/см (б)]

ного контура LC_2 , а изменения амплитуды выходных радиоимпульсов, неизбежные при изменении частоты заполнения, компенсировались регулировкой напряжения питания E выходного каскада генератора. Таким образом, при изменении частоты заполнения в указанных выше пределах амплитуда радиоимпульсов поддерживалась на постоянном уровне с точностью не хуже 2,5%. Измерения частоты заполнения, амплитуды и наблюдение за формой сигналов проводились с помощью широкополосного осциллографа С1-31, калиброванного с помощью образцового генератора стандартных сигналов ГКЗ-40.

На рис. 29, *а, б* показаны возбуждающий электрический и излучаемый акустический радиоимпульсы с частотой заполнения 15 МГц.

Снятая экспериментально в импульсном режиме сквозная амплитудно-частотная характеристика пары одинаковых иммерсионных преобразователей, работающих друг на друга через слой воды 10 мм в диапазоне частот 1—60 МГц, представляет собой практически прямую линию с точностью до ошибки измерения (менее $\pm 2 \div 5\%$), и только в области частот 0,3—1 МГц в частотной характеристике этих преобразователей с толщиной пьезоэлементов $l=5$ мм наблюдаются небольшие колебания (до 10%). Импульсный режим измерения частотной характеристики выбран нами с целью избежать влияния стоячих волн, которые неизбежно возникают в слое воды между преобразователями. Эта характеристика, как и осциллограммы (рис. 29), наглядно иллюстрируют, по-видимому, уникальное свойство описанных пьезопреобразователей — полную их аперийность, т. е. полное отсутствие резонансных свойств.

В распоряжении автора не было достаточно высоковольтного и мощного генератора радиоимпульсов на частоты выше 60 МГц. Однако ни теоретические, ни экспериментальные исследования, некоторые результаты которых будут еще приведены ниже, не дают оснований предполагать каких-либо аномалий в частотной характеристике преобразователя на частотах выше 60 МГц. Теоретически граничная частота описанного преобразователя определяется, по-видимому, только временем установлены ионной поляризации в пьезокерамике, определяющей пьезоэффект.

Это время, по оценкам разных

авторов [6, 41], составляет приблизительно 10^{-10} — 10^{-13} с, что соответствует частотам УЗ колебаний в сотни и тысячи гигагерц, лежащим далеко за пределами диапазона частот (20 кГц — 100 МГц), используемых в аппаратуре неразрушающего контроля и УЗ измерительных приборах.

На той же установке (см. рис. 27) экспериментально изучалась возможность излучения и приема ультракоротких акустических импульсов (наносекундной длительности). На рис. 30 показана осциллограмма [19, 26] акустического импульса длительностью около

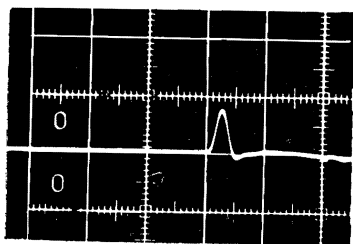


Рис. 30. Осциллограмма наносекундного акустического импульса, излучаемого аперийным преобразователем (масштаб по оси времени 20 нс/см)

8 нс на уровне 0,2, излученного и принятого преобразователями, использовавшимися для снятия частотной характеристики.

Для возбуждения преобразователя, имеющего емкость около 95 пФ, применяли генератор наносекундных импульсов, выполненный на кремниевом планарно-эпитаксиальном лавинном транзисторе. В усилителе, выполненном по той же схеме, что и на рис. 27, только с применением сверхвысокочастотных транзисторов КТ363Б и КТ356, имеющих граничную частоту усиления соответственно 1800 и 2500 МГц, собственное время установления составляло 1—1,5 нс. Минимальная длительность акустических импульсов, которую удавалось излучать и принимать с помощью описанных преобразователей и электронных схем, равна приблизительно 2 нс. Импульсы столь малой длительности наблюдали и исследовали с помощью стробоскопического осциллографа.

Таким образом, возможность излучения и приема с помощью аperiodического пьезопреобразователя ультракоротких акустических импульсов наносекундной длительности позволяет создавать импульсные ультразвуковые толщиномеры с разрешающей способностью (по стали и алюминию) до единиц микрометров, что до последнего времени вообще не представлялось возможным.

Если быстроедействие идеально-го преобразователя теоретически определяется временем установления ионной поляризации в пьезо-материале, то на практике минимальная длительность акустических импульсов (как и максимальная частота УЗ колебаний), которую можно достичь с помощью преобразователя, в значительной степени зависит от чистоты излучающей поверхности пьезоэлемента. В самом деле, излучающая поверхность пьезоэлемента (рис. 31) излучает акустические колебания как всеми своими впадинами, так и всеми гребешками неровностей одновременно с воздействием электрического импульса, возбуждающего пьезоэлемент. Поэтому после окончания действия возбуждающего электрического импульса к той части акустической энергии, которая была излучена гребешками шероховатости, прибавится с задержкой во времени h_1/c_1 (где h_1 — высота гребешков на излучающей поверхности пьезоэлемента, c_1 — скорость звука в материале электрода на излучающей поверхности пьезоэлемента) и энергия, излученная впадинами на поверхности пьезоэлемента.

То же происходит и на внешней поверхности электрода, расположенного на излучающей поверхности пьезоэлемента, граничащей с полезной акустической нагрузкой (например, с водой, как иммерсионной жидкостью).

Таким образом, длительность акустического импульса, излучаемого реальным пьезопреобразователем можно записать в виде

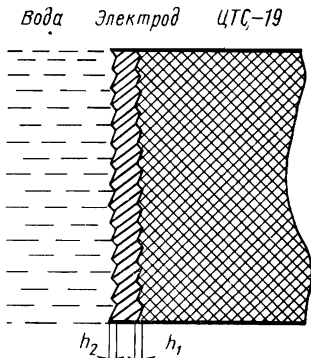


Рис. 31. К определению величины удлинения излучаемых акустических импульсов из-за шероховатости излучающей и принимающей поверхности пьезопреобразователя

$\tau_{\text{ак}} \approx \tau_{\text{эл}} + h_1/c_1 + h_2/c_2$, где $\tau_{\text{эл}}$ — длительность электрического импульса, возбуждающего преобразователь; h_2 — высота гребешков шероховатости на внешней поверхности электрода; c_2 — скорость распространения продольных УЗ колебаний в полезной акустической нагрузке.

Так, для пьезоэлементов из керамики ЦТС-19 и серебряных электродов при $h_1 = h_2 = 1$ мкм, что соответствует $Ra = 0,63 \div 1,25$, длительность излучаемых акустических импульсов при условии ее удвоения по сравнению с длительностью возбуждающего электрического импульса равна примерно 2 нс. Это справедливо с учетом того, что удлинение импульсов аналогичным образом происходит и при их приеме.

Как было показано, с помощью аperiodического пьезопреобразователя можно излучать и принимать акустические радиоимпульсы с частотой заполнения от сотен килогерц до сотен мегагерц с огибающей практически любой заданной формы. С их помощью можно излучать и «однополярные» видеоимпульсы механического сжатия или разрежения длительностью вплоть до единиц наносекунд.

Имеются сообщения [63] об излучении и приеме с помощью толстых пьезоэлементов однополярных акустических видеоимпульсов строго прямоугольной формы. Однако на практике на пути использования в реальных приборах однополярных акустических импульсов встречаются трудности, которые легко можно избежать, если использовать импульсы двухполярные.

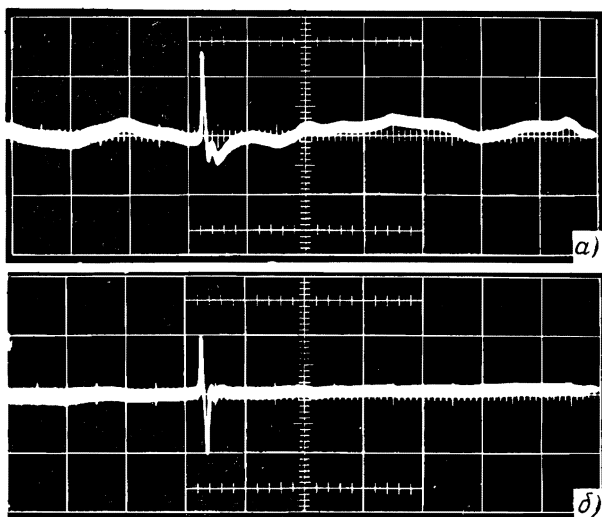


Рис. 32. Осциллограммы акустических импульсов, иллюстрирующие эффект ослабления радиальных колебаний:

а — при возбуждении пьезопреобразователя однополярным импульсом; *б* — при возбуждении двухполярным импульсом (масштаб по оси времени 0,4 мкс/см)

Дело в том, что в спектре однополярных видеоимпульсов имеются низкие частоты вплоть до постоянной составляющей. Это приводит к тому, что в излучаемых акустических импульсах присутствуют низкочастотные радиальные моды колебаний пьезоэлемента (см. рис. 17, б и 32), возникающие в поперечном сечении пьезоэлемента при пьезоэлектрическом сжатии или растяжении из-за механических деформаций у его боковых поверхностей [47, 57].

При возбуждении преобразователя электрическими импульсами определенной и постоянной длительности от радиальных колебаний можно избавиться, если боковую поверхность пьезоэлемента сделать шероховатой или нанести насечку так, что шероховатость или глубина насечки будет иметь порядок длины акустической волны, возбуждаемой в преобразователе. Именно таким образом автору удалось избавиться от радиальных колебаний в преобразователе, с помощью которого были получены наносекундные однополярные импульсы (см. рис. 30).

Этот способ подавления радиальных колебаний за счет их поглощения на шероховатой боковой поверхности, очевидно, не пригоден в случае необходимости возбуждать в одном приборе акустические импульсы разной длительности и формы. Специальная обработка боковой поверхности пьезоэлемента особенно нежелательна и при серийном производстве преобразователей.

Представляется наиболее целесообразным возбуждать пьезоэлемент двуполярными импульсами $U(t)$ (например, в виде одного периода синусоидальных колебаний), удовлетворяющими условию равенства нулю постоянной составляющей в частотном спектре сигнала:

$$\int_0^{\infty} U(t) dt = 0.$$

Низкочастотные составляющие в спектре такого

сигнала сильно ослаблены. Эксперимент подтвердил это. На рис. 32 в одном масштабе временной развертки осциллографа показаны акустические импульсы, излучаемые иммерсионным аperiodическим преобразователем с обычной гладкой боковой поверхностью в случаях возбуждения его одно- и двуполярным акустическим импульсом.

Эффект возбуждения преобразователя двуполярными импульсами разителен. Возбуждение аperiodических пьезопреобразователей такими импульсами полезно на практике еще и тем, что позволяет избежать необходимости применения сложных схем широкополосных усилителей с полосой пропускания практически от постоянного тока. Кроме того, как будет показано ниже, во многих случаях разрешающая способность аппаратуры при одной и той же длительности более чем в 2 раза выше при использовании двуполярных импульсов, нежели однополярных. Сужение полосы пропускания усилителя позволяет резко снизить его собственные шумы, а значит, и повысить чувствительность аппаратуры в целом. Использование двуполярных импульсов в некоторой степени упрощает и схемные решения электронной аппаратуры, обрабатывающей информацию, приносимую этими импульсами, так как, например, в эхо-импульсных толщиномерам позволяет, как будет показано в гл. III, осуществлять временную привязку как к положительной, так и к отрицательной полуволнам этих импульсов.

В заключение данного параграфа рассмотрим несколько вариантов аperiodических пьезопреобразователей, разработанных в по-

следнее время [25] [А. с. 509826 (СССР); А. с. 507815 (СССР); А. с. 434623 (СССР)], и отличающихся высокой технологичностью при серийном производстве. Главной и общей их особенностью является то, что пьезоэлемент и акустическая ловушка монолитны и выполнены заодно из одного куска пьезокерамики.

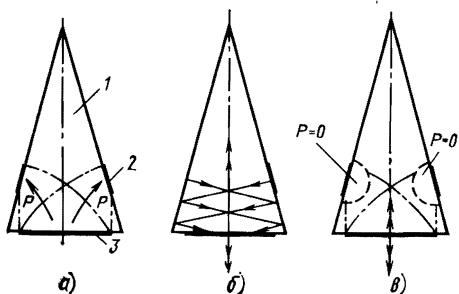


Рис. 33. Монолитный аperiodический пьезопреобразователь

На рис. 33 дано схематическое изображение пьезопреобразователя, поясняющее принцип его работы. Он представляет собой монолитный блок из пьезокерамики в виде конуса 1. На его излучающей поверхности расположен нижний электрод 3, на боковой поверхности — кольцевой электрод 2. Поляризуется пьезоэлемент обычным способом — применением постоянного электрического напряжения к

электродам 3, 2 [6]. Затем часть объема пьезоэлемента, непосредственно прилегающая к электроду 2, депольаризуется так, как это было описано выше [19, 26], чтобы степень поляризации плавно убывала от максимума у электрода 3, до нуля у электрода 2.

Поясним принцип действия этого преобразователя, рассмотрев сначала его работу в случае, когда все пространство в его объеме между электродами, очерченное штрихпунктирной линией (рис. 33, а) равномерно поляризовано. (Стрелками условно показано направление вектора поляризации P). При этом в момент подачи на электроды импульса электрического напряжения механические деформации, т. е. ультразвуковые колебания, возникают как у электрода 3, так и у электрода 2. Ультразвуковые импульсы, возникающие у электрода 3, распространяются (см. двойные стрелки на рис. 33, б) как в полезную нагрузку (вниз на рис. 33, б), так и к вершине конуса, представляющего собой акустическую ловушку, которая полностью поглощает эту часть энергии. Импульсы, возникающие у электрода 2, претерпев многократные отражения в объеме пьезоэлемента, как это показано стрелками на рис. 33, б, с некоторой задержкой тоже попадают в полезную нагрузку через основание конуса и представляют собой акустические помехи.

Если же часть объема пьезоэлемента в непосредственной близости от электрода 2 (см. штриховые линии на рис. 33, в) полностью депольаризована (вектор поляризации $P=0$), пьезоэффект в пьезоэлементе у электрода 2 отсутствует; ультразвуковые колебания у этого электрода не возникают, т. е. исчезают импульсы акустических помех в полезной нагрузке.

Таким образом, на воздействие каждого возбуждающего электрического импульса пьезопреобразователь отвечает только одним акустическим импульсом. Отсутствие поверхности в преобразователе, показанном на рис. 33, параллельной основанию конуса, на котором возникают ультразвуковые колебания, и отражающей эти колебания, исключает условия появления стоячих волн в объеме пьезопреобразователя, т. е. исключает возможность акустического

резонанса. Это означает полную аperiodичность описанного пьезоэлектрического преобразователя, которая при условиях, описанных выше, сохраняется и в режиме приема ультразвуковых импульсов.

Технологически этот преобразователь, в отличие от описанного выше, крайне прост в изготовлении, например, методами холодного и горячего прессования или литья под давлением [6], т. е. наиболее распространенными методами в керамическом производстве.

Нетрудно показать, что все без исключения расчетные соотношения и характеристики, приведенные выше, полностью справедливы и для преобразователя, представленного на рис. 33, который по существу аналогичен преобразователю с приклеиваемой акустической ловушкой и отличается от него лишь более простой технологией изготовления. Добавим только, что экспериментальные образцы этого преобразователя были изготовлены путем кругового шлифования из пьезокерамических цилиндров (рис. 34) [25].

На рис. 35 показана конструкция второго варианта аperiodического пьезопреобразователя. Он также представляет собой монолитный блок из пьезокерамики. Форма его такова, что напротив возмущенного серебряного электрода 1 на его лицевой (излучающей в полезную нагрузку) поверхности расположена акустическая ловушка 2 в виде конуса. Второй электрод 3 расположен на тыльной (не излучающей в полезную нагрузку) поверхности таким образом, что его проекция на плоскость, параллельную плоскости электрода 1, не совпадает с проекцией последнего на ту же плоскость.

Вокруг электрода 1 имеется кромка, не параллельная электроду 3, причем угол ее наклона β выбран таким, чтобы ультразвуковые колебания, распространяющиеся от поверхности с электродом 3,

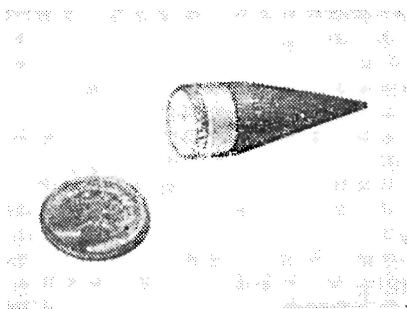


Рис. 34. Внешний вид монолитного пьезопреобразователя

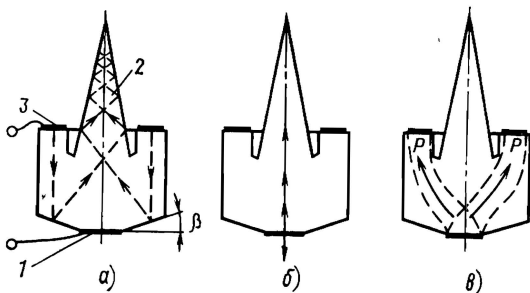


Рис. 35. Монолитный аperiodический пьезопреобразователь без деполяризации

отражаясь от этой кромки, попадали, как это показано на рис. 35, а, в конус акустической ловушки.

Преобразователь работает следующим образом. Импульсы электрического напряжения прикладываются к электродам 1 и 3. В непосредственной близости от этих электродов возникают продольные ультразвуковые колебания. Часть энергии этих колебаний, возникающих у электрода 1, уходит в полезную акустическую нагрузку преобразователя. (вниз на рис. 35, б); другая часть, распространяясь внутрь пьезоэлемента, попадает в акустическую ловушку 2 и затухает в ней. Вся энергия ультразвуковых колебаний, возникающих у электрода 3, распространяется внутрь пьезопреобразователя и, отразившись от наклонной кромки вокруг электрода 1, тоже уходит в акустическую ловушку (рис. 35, а), не попадая на лицевую поверхность пьезоэлемента.

Таким образом, излучающей в полезную акустическую нагрузку является только поверхность пьезопреобразователя, несущая электрод 1. Напротив этой поверхности нет поверхностей, параллельных ей, а значит, и отсутствуют условия возникновения стоячей волны в объеме преобразователя, т. е. этот преобразователь полностью аперiodичен, как и описанный выше.

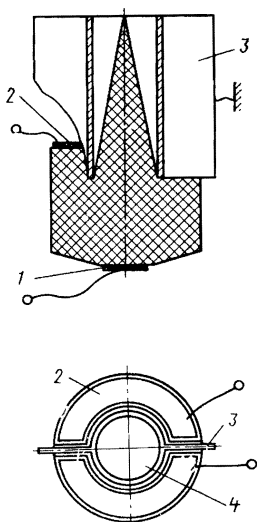


Рис. 36. Раздельно-совмещенный вариант монолитного аперiodического пьезопреобразователя без деполаризации

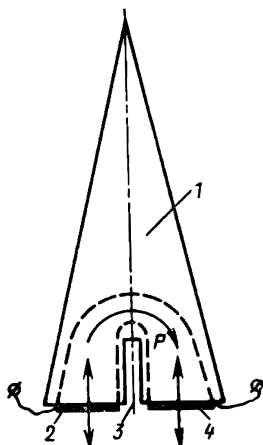


Рис. 37. Монолитный аперiodический пьезопреобразователь с электродами на одной излучающей (принимающей) поверхности

В рассмотренном пьезопреобразователе отсутствуют условия возникновения сдвиговых колебаний. Это объясняется тем, что пьезоэффективность он приобретает в результате поляризации постоянным электрическим полем, создаваемым приложением поляризующего напряжения к тем же электродам 1 и 3. Это делает вектор остаточной поляризации всегда параллельным силовым линиям лю-

бого, как постоянного, так и переменного электрического полей (рис. 35, *в*), возникающих в пьезоэлементе в результате приложения электрического напряжения к электродам 1 и 3. Штриховыми линиями на рис. 35, *в* условно показаны те участки преобразователя, где сосредотачивается основная часть энергии электрических поляризующих и возбуждающих полей.

На рис. 36 показана конструкция полезной для практики модификации преобразователя, представленного на рис. 35. Если на тыльной его поверхности сделать на небольшую глубину (порядка 0,2—0,4 расстояния между электродами 1 и 2) пазы и вставить в них металлический экран 3, как это показано на рис. 36, то электрод 2, например, можно использовать для возбуждения преобразователя, а электрод 4 — для снятия электрических сигналов в режиме приема ультразвуковых колебаний. Металлический экран 3 предотвращает наводку мощного возбуждающего генераторного импульса на вход приемного усилителя.

Раздельно-совмещенный преобразователь, показанный на рис. 36, обладает преимуществами аperiodических преобразователей и особенно полезен на практике в тех случаях, когда исключена возможность включения между преобразователем и контролируемым изделием ультразвуковой линии задержки, например при необходимости одной искательной головкой прозвучивать глубины от десятых долей до сотен миллиметров. В этом случае необходимо полностью исключать насыщение приемного усилителя возбуждающим генераторным импульсом, что является крайне сложной технической задачей при совмещении выхода генератора и входа усилителя на одном пьезоэлементе.

На рис. 37 показан еще один вариант аperiodического пьезообразователя. Преобразователь представляет собой монолитный блок из пьезокерамики в виде конуса 1. На его излучающей поверхности расположены оба электрода 2 и 3. Поляризуется пьезообразователь обычным способом — применением постоянного электрического напряжения между электродами 2 и 3. Область объема пьезообразователя с наибольшей степенью поляризации условно ограничена на чертеже штриховой линией. Направление вектора поляризации в этой области также условно показано изогнутой стрелкой *P*. Щелевидное углубление 3 сделано между электродами 2 и 4 для того, чтобы напряженности поляризующего и возбуждающего пьезоэлемент электрических полей были более равномерными по площади электродов в непосредственной близости от последних. В противном случае пьезомодуль керамики оказывается максимальным у правого края электрода 2 и у левого края электрода 4, что приводит к большой и нежелательной на практике неравномерности акустического давления в сечении ультразвукового пучка, излучаемого с поверхности преобразователя, несущей электроды 2 и 4. Экспериментально установлено [25], что глубина щели из соображений получения максимального пьезомодуля при поляризации и минимальной неоднородности ультразвукового поля при излучении составляет полную или половину ширины электродов в сечении, показанном на чертеже. Ширина щели должна быть минимальной но достаточной для введения в нее на время поляризации пластинки диэлектрика такой толщины, чтобы выдержать без электрического пробоя напряжение порядка 5—15 кВ между электродами 2 и 4. При использовании защитных прокладок из фторопласта щель 3 имеет ширину 0,8—1,2 мм.

Работает преобразователь следующим образом. При приложении электрического переменного или импульсного напряжения к электродам 2, 4 последние смещаются вместе с основанием пьезокерамического конуса 1 в одном направлении вверх или вниз по чертежу, как это показано прямыми стрелками, в зависимости от полярности прикладываемого напряжения. Таким образом, в преобразователе возникают механические (ультразвуковые) колебания, которые излучаются обеими частями основания конуса, несущими электроды 2 и 4, распространяются как внутрь преобразователя к вершине конуса, так и в сторону полезной нагрузки (вниз по чертежу).

В режиме приема ультразвуковых импульсов акустическое давление, прикладываемое ко всей или части поверхности основания конуса преобразователя, вызывает в силу прямого пьезоэффекта появление на электродах 2, 4 электрических зарядов разного знака и, как следствие, разность потенциалов.

Часть акустической энергии, возникшей в пьезопреобразователе в режиме излучения и ушедшей к вершине конуса, представляющего собой акустическую ловушку, поглощается в ней, рассеиваясь в виде тепла, и не возвращается обратно к основанию конуса. Таким образом, на воздействие каждого возбуждающего электрического импульса пьезопреобразователь отвечает только одним акустическим импульсом.

Отсутствие в описанном пьезопреобразователе поверхности, отражающей акустические колебания и параллельной основанию конуса, на котором они возникают, исключает, как и в предыдущих вариантах преобразователей, условия появления стоячих волн в объеме пьезопреобразователя, т. е. исключает возможность акустического резонанса. Это означает полную аperiodичность описанного пьезоэлектрического преобразователя, которая, кстати говоря, сохраняется и в режиме приема акустических колебаний. Форма акустических импульсов, излучаемых описанным преобразователем, полностью повторяет форму возбуждающих его электрических импульсов.

Экспериментальные образцы преобразователей, представленных на рис. 33, 35 и 37, были испытаны в комплекте с эхо-импульсным, толщиномером УТ-30К [32].

4. ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКИХ СХЕМ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА С АПЕРИОДИЧЕСКИМ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

В предыдущем параграфе было показано, что предложенный пьезопреобразователь полностью аperiodичен в режиме приема, если он при этом нагружен на малое (в пределе — равное нулю) входное сопротивление $r_{вх}$ усилителя. Это значит, что постоянная времени входной цепи усилителя $\tau_{вх} \approx C_0 r_{вх}$ (где C_0 — емкость пьезопреобразователя) должна быть намного меньше длительности излучаемых и принимаемых акустических импульсов. Так, при длительности импульса 25—50 нс, обеспечивающей разрешающую способность прибора приблизительно 0,05—0,15 мм, $\tau_{вх}$ должно быть не более 2,5—5 нс. При наиболее часто используемой на практике емкости $C_0 \approx 100$ пФ сопротивление $r_{вх}$ должно быть не более 25—50 Ом. Отсюда видно, что шунтирование входа широкополосного усилителя напряжения столь малым сопротивлением приводит к резкому уменьшению амплитуды сигналов, снимаемых с преобразователя, до 0,1—0,01 мВ [27, 68]. Это крайне нежелательно так как

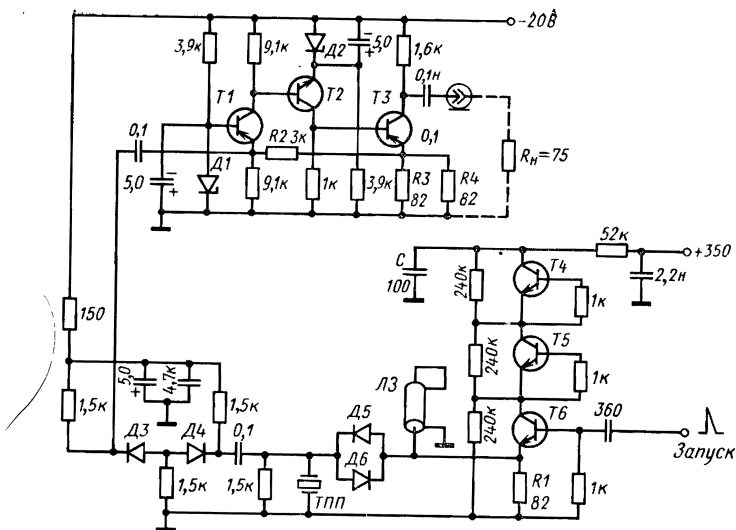


Рис. 38. Принципиальная схема приемно-передающего устройства для совмещенного апериодического пьезопреобразователя (Д1, Д2 — КС182А; Д3 — КД510А; Д4 — Д6 — КД513А; Т1, Т3 — КТ347А; Т2 — КТ316В; Т4—Т6 — КТ315И)

требует или увеличения коэффициента усиления усилителя до 10^5 — 10^6 при полосе пропускания до 50—80 МГц или при сравнительно умеренном (10^3 — 10^4) коэффициенте усиления применения генератора, возбуждающего преобразователь, с амплитудой выходных импульсов наносекундной длительности до 10^3 — 10^4 В. И то и другое примерно в равной степени представляет большую трудность на практике, особенно в полупроводниковой электронике.

С учетом сказанного разработана схема транзисторного электроакустического тракта, полностью отвечающего специфике применения апериодических пьезопреобразователей.

Его принципиальная схема показана на рис. 38. Генератор зондирующих импульсов представляет собой [22] цепочку включенных последовательно лавинных транзисторов Т4—Т6 [11]. В исходном состоянии Т4—Т6 заперты и конденсатор С заряжен до напряжения 300—320 В. Генератор запускается импульсами напряжения положительной полярности амплитудой 1,5 В. При лавинном пробое транзисторов Т4—Т6 конденсатор разряжается через них на резистор R1, на котором в отсутствие формирующего отрезка кабеля ЛЗ (РК-75-1-11; 1,75 м), появляются импульсы напряжения примерно колоколообразной формы длительностью $t_{\text{н}} \approx 25$ нс. Включение параллельно R1 отрезка кабеля, короткозамкнутого на конце, с временем задержки $t_3 = t_{\text{н}}/2 \approx 12,5$ нс приводит к тому, что на R1 формируется двупольный импульс длительностью 50 нс, близкий по форме к одному периоду синусоидальных колебаний.

В схеме генератора применены планарно-эпитаксиальные транзисторы КТ315И в лавинном режиме. При этом амплитуда выход-

ных импульсов на пьезопреобразователе емкостью $C_0=90$ пФ равна 110 В.

С выхода генератора высоковольтные импульсы напряжения через пару диодов $D5, D6$ включенных встречно-параллельно, поступают на пьезопреобразователь ТПП. Назначение диодов $D5, D6$ состоит в том, что они беспрепятственно пропускают высоковольтные импульсы с выхода генератора на преобразователь и отключают (благодаря наличию «пятки» на их вольтамперных характеристиках) малое выходное сопротивление генератора от преобразователя в режиме приема акустических импульсов.

Некоторое превышение сопротивления резистора $R1$ над величиной волнового сопротивления $\rho=75$ Ом формирующего кабеля позволяет несколько скомпенсировать рассогласование кабеля емкостью преобразователя.

Электрические импульсы с выхода преобразователя в режиме приема поступают на вход усилителя импульсов тока на транзисторах $T1-T3$ через ограничитель тока, выполненный на диодах $D3, D4$. Ограничитель не пропускает на вход усилителя высоковольтные импульсы с генератора и беспрепятственно пропускает импульсы с пьезопреобразователя в режиме приема. Это происходит потому, что диоды $D3$ и $D4$ открыты небольшим (около 4 мА) постоянным током и имеют при этом дифференциальное прямое сопротивление 3—4 Ом каждый. Включенные встречно-последовательно, эти диоды по очереди запираются высоковольтными двуполярными импульсами с генератора, пропуская на вход усилителя скачок тока не более ± 4 мА, а для импульсов малого тока (как правило, меньших 100—300 мкА) с выхода пьезопреобразователя, работающего в режиме приема, диоды $D3, D4$ представляют собой просто активное сопротивление 6—8 Ом, включенное последовательно с входным сопротивлением усилителя.

Усилитель импульсов тока на транзисторах $T1-T3$ выполнен по схеме с параллельной отрицательной обратной связью по току [56] и имеет следующие характеристики: $r_{вх} \approx 3$ Ом, коэффициент усиления по току $K_i \approx R_2(R_3+R_4)/(R_3R_4)=41$, полоса пропускания 0,2—65 МГц. Постоянная времени входной цепи усилителя $\tau_{вх} \approx C_{огр_{вх}} \approx 1$ нс, что при приеме преобразователем акустических импульсов длительностью более 10 нс практически эквивалентно работе преобразователя в режиме короткого замыкания.

Полезно отметить, что в случае применения усилителя тока с малым входным сопротивлением полностью исключается противоречие между необходимостью уменьшения $r_{вх}$ и, как следствие, повышением коэффициента усиления, как это имело место в случае применения усилителя напряжения. Уменьшение $r_{вх}$ и прямого сопротивления диодов $D3, D4$ приводит только к увеличению амплитуды тока или заряда, переносимого импульсами с пьезопреобразователя на вход усилителя.

Электронная схема полностью смонтирована в виде выносной головки, в которую винчивается пьезопреобразователь так, что между схемой и преобразователем отсутствует соединительный кабель. Это исключает паразитные отражения наносекундных импульсов в кабеле, который принципиально невозможно хорошо согласовать с реактивной нагрузкой, какой является преобразователь.

Проверка описанного приемно-передающего устройства при работе с иммерсионным аperiодическим пьезопреобразователем проводилась на экспериментальной установке, показанной на рис. 39.

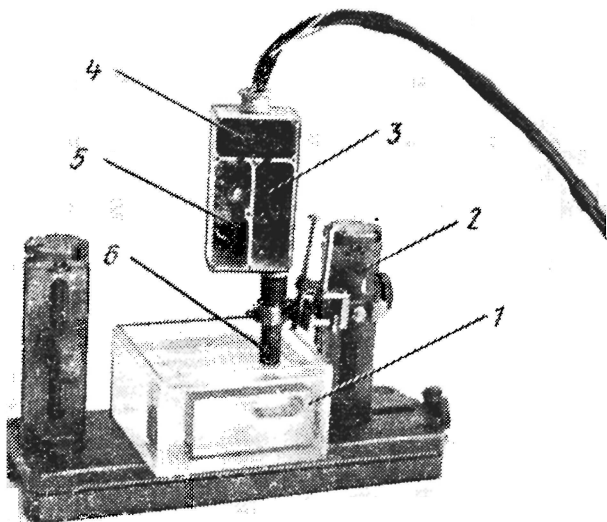


Рис. 39. Экспериментальная установка для исследования приемно-передающего устройства с иммерсионным аперодическим пьезопреобразователем:

1 — ванночка для иммерсионной жидкости; 2 — механизм перемещения преобразователя; 3 — генератор зондирующих импульсов; 4 — формирующий кабель; 5 — усилитель импульсов тока; 6 — пьезопреобразователь

Выносная головка вместе с преобразователем 6 закреплялась в механизме перемещения 2, позволяющем устанавливать преобразователь и облучать контролируемое изделие под любым углом в пределах телесного угла 35° .

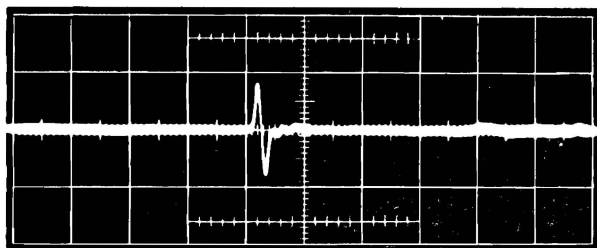


Рис. 40. Осциллограмма акустического эхо-импульса, получаемого на установке, представленной на рис. 39 (масштаб по оси времени 200 нс/см, по вертикали 200 мВ/см)

На рис. 40 показана осциллограмма акустического импульса, отраженного от шлифованного стального кубика, погруженного в воду. Форма и амплитуда импульсов тока на выходе усилителя наблюдались по падению напряжения на $R_H=75$ Ом (см. рис. 38) с

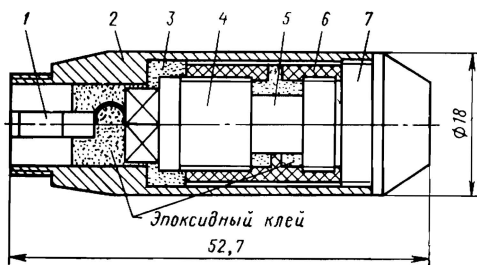


Рис. 41. Общий вид конструкции контактного аperiodического пьезопреобразователя

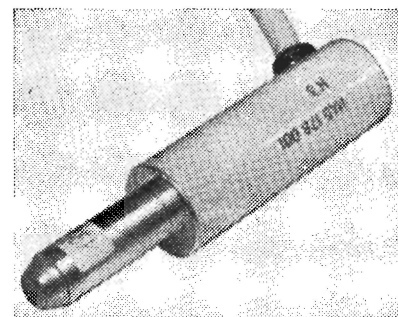
помощью широкополосного осциллографа С1-31. Эта осциллограмма еще раз наглядно иллюстрирует аperiodичность преобразователя, в точности повторяющего форму возбуждающего электрического импульса, и позволяет количественно проверить выражение (25) для расчета коэффициента двойного преобразования аperiodического пьезопреобразователя.

Амплитуда импульса тока на выходе усилителя $I_m = U_{\text{вых}}/R_H K_i = 55$ мкА, где $U_{\text{вых}}$ — амплитуда импульса напряжения на R_H .

Расчет I_m по формуле (25) дает величину тока на входе усилителя, равную приблизительно 52 мкА.

Аperiodический преобразователь был изготовлен на основе пьезоэлемента из керамики ЦТС-19 диаметром 8 мм и толщиной $l=5$ мм. При расчете I_m величины, входящие в (25), имели следующие значения: $d_{33}=2 \times 10^{-10}$ м/В; $E^{\text{к}}=7,53 \cdot 10^{10}$ Па, $\epsilon=1500$; $C_0=9 \cdot 10^{-11}$ Ф; $s=5 \cdot 10^{-5}$ м²; $U_0=110$ В; $z_2=1,49 \cdot 10^6$ кг/м²с; $z=29,1 \times 10^6$ кг/м²с; $K_{23}=0,93$; $\alpha=0,868$ дБ/см.

Специально для УЗ толщиномеров, рассчитанных на измерение малых (до 0,1 мм) толщин, разработана [60] конструкция совмещенного



—Рис. 42. Выносная искательная головка к ультразвуковым толщиномерам УТ-30К и УТ-30ПЦ с контактным аperiodическим пьезопреобразователем

контактного аperiodического преобразователя, пригодного для серийного выпуска. Этому преобразователю присущи некоторые конструктивные особенности, которые полезно рассмотреть, так как они

накладывают дополнительные требования к электронным узлам приборов.

Общий вид преобразователя показан на рис. 41. Он состоит из латунного корпуса 2, в который ввинчена УЗ линия задержки 7, выполненная из магниевого сплава МА17, предназначенного специально для широкополосных (до 100—150 МГц) линий задержки. К левому по рис. 41 торцу линии эпоксидной смолой приклеен толстый пьезоэлемент 5, к которому с другой стороны приклеен стержень 4 из латуни марки ЛС59-1. Узел, состоящий из линии задержки, пьезоэлемента и латунного стержня 4, стянут изоляционной капролоновой втулкой 6. К левому по рис. 41 торцу латунного стержня 4 припаян гнездовой контакт 1. Через пластичную капролоновую втулку 3 корпус преобразователя дополнительно при ввинчивании в него линии задержки 7 стягивает между собой латунный стержень 4, пьезоэлемент и линию задержки, фиксируя тем самым полученную при помощи втулки 6 степень сжатия пьезоэлемента. После сборки преобразователя для повышения механической прочности конструкции все полости внутри корпуса и втулки 6 заливаются эпоксидной смолой, как это показано на рис. 41. Этой же смолой фиксируется центральное относительно отверстия в левом конце корпуса положение гнездового контакта 1, который вместе с левой частью корпуса образует высокочастотный коаксиальный разъем. Посредством этого разъема преобразователь соединяется с корпусом выносной искательной головки (рис. 42), в которой смонтирована схема, показанная на рис. 38.

Особенностью описанного преобразователя является то, что пьезоэлемент с тыльной стороны граничит не с акустической ловушкой, а со стержнем из латуни ЛС-59-1, имеющей акустический импеданс, равный с высокой точностью импедансу керамики ЦТС-19, из которой изготовлен пьезоэлемент. Это позволило существенно сократить размеры преобразователя, так как при использовании акустической ловушки для нормальной его работы, т. е. для практически полного исключения возвращения к пьезоэлементу импульсов, ушедших в акустическую ловушку и отраженных от ее боковой поверхности, отношение высоты конуса ловушки к диаметру ее основания должно быть, как это показали эксперименты с акустическими ловушками различной конфигурации и размеров, не менее 5—7.

Так, хорошие результаты были получены только с конусом акустической ловушки, имевшей высоту 50 мм при диаметре основания 9 мм (диаметр пьезоэлемента был равен 8,5 мм). Амплитуда акустических помех из-за отражений в ловушке не превышала 0,05—0,1% амплитуды полезного сигнала, излучаемого преобразователем в нагрузку УЗ линии задержки.

Поскольку плоская поверхность латунного стержня, противоположная пьезоэлементу, является хорошим отражателем акустических импульсов, излучаемых в него пьезоэлементом, то спустя интервал времени $t_{\text{ЛС}} + t_{\text{ТПП}}$ после возбуждения пьезоэлемента (где $t_{\text{ЛС}}$ — удвоенное время пробега акустического импульса по латунному стержню, $t_{\text{ТПП}}$ — то же, вдоль пьезоэлемента) этот импульс вновь появится у излучающей поверхности пьезоэлемента, примыкающей к линии задержки, и даст соответствующий электрический импульс на вход усилителя. При определенных условиях этот импульс, отра-

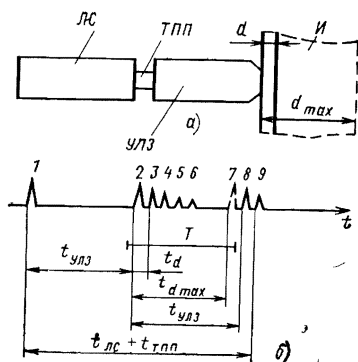


Рис. 43. К выбору длины УЗ линии задержки и латунного стержня на тыльной поверхности пьезоэлемента в практическом варианте аperiodического пьезопреобразователя

толщиной d , так и через толщу пьезоэлемента в латунный стержень ЛС. Длина линии выбирается такой [7], чтобы время $t_{улз}$ пробега акустического импульса по ней от пьезоэлемента и обратно было больше удвоенного времени пробега $t_{d\max}$ акустического импульса по контролируемому изделию максимальной контролируемой толщины d_{\max} . При этом временная диаграмма импульсов на входе усилителя в приборе для изделия толщиной d выглядит так, как это показано на рис. 43, б, где 1 — акустический импульс с генератора, возбуждающий пьезоэлемент; 2 — акустический эхо-импульс от внешней поверхности изделия; 3 — эхо-импульс от внутренней поверхности изделия; 4—6 — акустические импульсы, многократно отраженные от обеих поверхностей изделия; 8 — акустический импульс 2, претерпевший многократные отражения в объеме линии задержки (импульсы 3—6, повторно следующие за импульсом 8, для простоты на рис. 43, б опущены). При контроле изделия максимальной толщины d_{\max} , на которую рассчитан преобразователь, эхо-импульс 7 от внутренней поверхности изделия появляется там, где это показано на рис. 43, б, т. е. еще до появления паразитного импульса 8.

На основании сказанного можно записать требование к длине латунного стержня

$$t_{лс} + t_{тпп} \geq 2t_{улз}, \quad (27)$$

отражающее то, что акустический импульс 9 (рис. 43, б), отраженный от левой по рис. 41 торцевой поверхности латунного стержня, не должен попадать во временной интервал между импульсами 2 и 8. Таким образом, только на временном интервале T (рис. 43, б) предложенный контактный преобразователь полностью аperiodичен, что является его первой особенностью, которую следует учитывать на практике. Необходимая длина латунного стержня и УЗ линии задержки определяется в зависимости от требуемой максимальной

женный от конца латунного стержня, не мешает нормальной работе прибора.

Рассмотрим эти условия. На рис. 43 приведена схема акустического тракта: контактный преобразователь — контролируемое изделие (рис. 43, а) и временная диаграмма (рис. 43, б), поясняющая ее работу (слой контактной смазки не учтен, так как для данного случая время задержки УЗ колебаний в нем по сравнению с рассматриваемым временем пренебрежимо мало). При возбуждении пьезоэлемента ТПП электрическим импульсом акустические импульсы возникают у его поверхности, примыкающей к УЗ линии задержки (УЛЗ), и распространяются как в линию задержки и далее в контролируемое изделие I

измеряемой толщины изделий из следующих двух неравенств, вытекающих из (27):

$$l_{\text{ЛС}} \geq c_{\text{ЛС}} \left(\frac{2l_{\text{УЛЗ}}}{c_{\text{УЛЗ}}} - \frac{l_{\text{ТПП}}}{c_{\text{ТПП}}} \right); \quad (28)$$

$$\frac{l_{\text{УЛЗ}}}{c_{\text{УЛЗ}}} > (1,2 \div 1,5) \frac{d_{\text{max}}}{c_{\text{и}}}, \quad (29)$$

где $l_{\text{ЛС}}$, $l_{\text{УЛЗ}}$, $l_{\text{ТПП}}$ — длина латунного стержня, длина линии задержки и толщина пьезоэлемента соответственно; $c_{\text{ЛС}}$, $c_{\text{УЛЗ}}$, $c_{\text{ТПП}}$ — соответствующие скорости распространения продольных УЗ колебаний; $c_{\text{и}}$ — то же в материале изделия.

Коэффициент 1,2—1,5 в неравенстве (29) отражает тот факт, что между импульсами 7 и 8 (рис. 43, б) всегда должен быть временной интервал, достаточный для их разделения при временной селекции интервала T . С помощью обычной временной селекции из всей серии импульсов выбираются только импульсы, попадающие в интервал времени T , т. е. импульсы, отраженные от обеих поверхностей контролируемого изделия и несущие, в частности, информацию о толщине контролируемого изделия.

Вторая конструктивная особенность предложенного преобразователя состоит в том, что электродами у пьезоэлемента служит те-

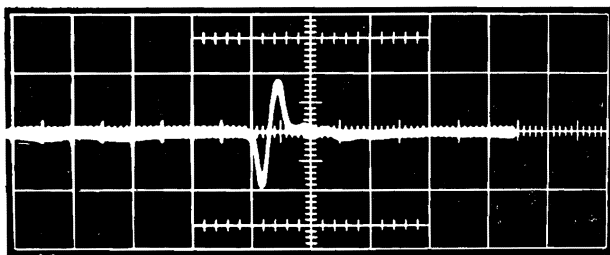


Рис. 44. Оциллограмма акустического импульса, излучаемого контактным пьезопреобразователем, показанным на рис. 41 (масштаб по оси времени 90 нс/см)

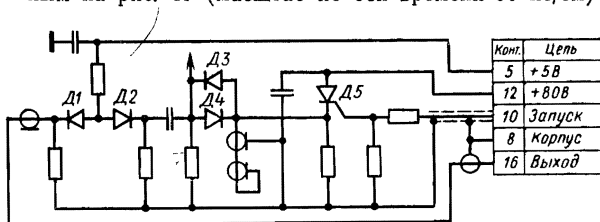


Рис. 45. Принципиальная схема выносной искательной головки к толщиномеру УТ-31МЦ ($D1 - D4 - КД513А$; $D5 - КУ104Г$)

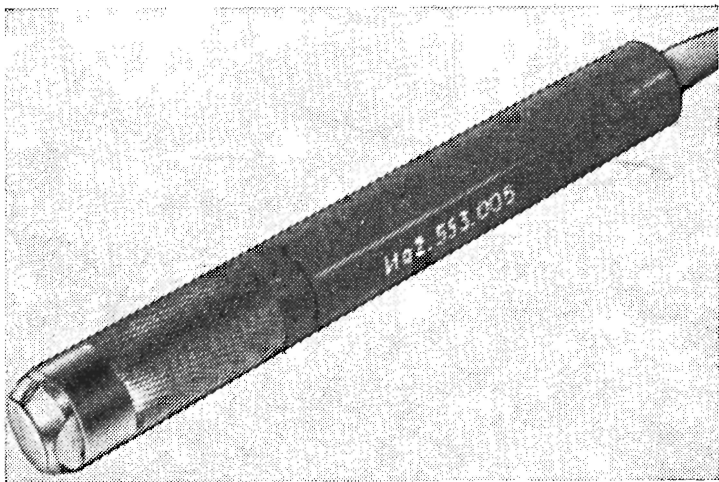


Рис. 46. Общий вид искательной головки к толщиномеру УТ-31МЦ

до линии задержки (на излучающей поверхности) и тело латунного стержня (на тыльной поверхности пьезоэлемента). Необходимость удаления собственных возжженных серебряных электродов с пьезоэлемента вызвана тем, что для хорошего акустического согласования пьезоэлемента с латунным стержнем и линией задержки склеиваемые поверхности приходится обрабатывать до весьма высокой чистоты. При этом поверхности пьезоэлемента, на которые нанесены электроды, имеют, как правило, шероховатость $Rz=40\div 20$. Если электроды полностью не сошлифовать, в них образуются «прогалыны», и новые электроды, образованные латунным стержнем и линией задержки, будут контактировать с пьезоэлементом частично через остатки хорошо возжженных электродов, частично через тонкий (2—5 мкм) слой эпоксидной смолы. Это приводит к появлению импульсов акустических помех, возникающих из-за паразитных отражений у границы латунный стержень—пьезоэлемент от остатков электрода, имеющего акустическое сопротивление, отличное от сопротивления пьезоэлемента и стержня.

Осциллограмма акустического импульса, излучаемого контактным пьезопреобразователем (см. рис. 41), работающим с приемно-передающим трактом (см. рис. 38), показана на рис. 44.

На рис. 45 показана принципиальная схема еще одного варианта выносной искательной головки к ультразвуковому толщиномеру. В отличие от схемы, показанной на рис. 38, в этой головке размещены только генератор, выполненный на миниатюрном быстродействующем тиристоре $D5$, ограничитель тока $D1$, $D2$ и схема отключения (на диодах $D3$, $D4$) генератора в режиме приема УЗ импульсов, аналогичные представленным на рис. 38.

Общий вид головки показан на рис. 46. Она рассчитана на работу с таким же серийным пьезопреобразователем, как и головка,

показанная на рис. 42. Усилитель эхо-сигналов монтируется в корпусе толщиномера (см. гл. III). Это позволило резко сократить размеры и массу выносной головки; ее длина вместе с пьезопреобразователем 148 мм, диаметр 18 мм.

В заключение этого параграфа добавим, что несмотря на большие габаритные размеры серийная выносная искательная головка к приборам УТ-30ПЦ и УТ-30К (см. рис. 38 и 42), содержащая целиком электроакустический тракт с аperiodическим пьезопреобразователем, может быть без каких-либо переделок использована в УЗ дефектоскопах с высокой разрешающей способностью.

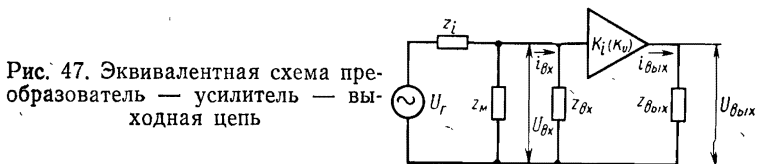
5. ПРИМЕНЕНИЕ УСИТЕЛЕЙ ТОКА В ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОМ ТРАКТЕ

При разработке ультразвуковой аппаратуры нами впервые были применены усилители тока с малым входным сопротивлением, позволяющие использовать режим короткого замыкания пьезопреобразователей при приеме УЗ колебаний [24, 26]. При применении толстых аperiodических пьезопреобразователей необходимость режима короткого замыкания преобразователя диктуется главным образом необходимостью уменьшения постоянной времени входной цепи по сравнению с длительностью принимаемых акустических импульсов. Однако при использовании усилителя тока получается заметный выигрыш в коэффициенте усиления широкополосного усилителя сигналов, снимаемых с преобразователя [24].

В связи с этим представляет интерес несколько шире рассмотреть вопрос применения усилителей тока с различными, в том числе и неаperiodическими, пьезопреобразователями.

Выполним с этой целью сравнительный анализ двух упомянутых способов усиления сигналов применительно к УЗ аппаратуре [40] и выведем расчетные формулы, позволяющие устанавливать, какой из них предпочтительнее в конкретных практических условиях.

Независимо от типа усилителя поступающую с его выхода информацию, как правило, легче обрабатывать, если она представлена в виде электрического напряжения. Поэтому в качестве основного параметра будем пользоваться величиной K модуля коэффициента усиления, необходимого для получения на выходе усилителя определенного напряжения. Очевидно, что выгоднее тот способ усиления, при котором K окажется меньше.



На рис. 47 приведена общая эквивалентная схема преобразователя, входной цепи и усилителя. Преобразователь представлен эквивалентным генератором напряжения U_r с внутренним сопротивлением z_i . Через z_m обозначен электрический импеданс входной це-

пи, в который входят емкость кабеля и монтажа и другие элементы, через $z_{вх}$ и $z_{вых}$ — входной и выходной импедансы собственно усилителя, условно показанные вне усилителя. Все упомянутые импедансы, а также напряжения и токи в общем случае комплексные.

Рассмотрим сначала случай усиления по напряжению. При этом для повышения входного напряжения $U_{вх}$ обычно стремятся приблизить режим работы преобразователя к режиму холостого хода путем увеличения $|z_{вх}|$ и $|z_{вых}|$. Величина $|z_{вх}|$ может быть сделана достаточно большой за счет применения во входной цепи полевого транзистора. Значение $|z_{м}|$ можно увеличить путем нейтрализации емкости кабеля параллельной индуктивностью [15] или введением повторителя напряжения непосредственно в искатель. Однако такие меры увеличения $|z_{м}|$ оправданы далеко не всегда, поэтому в общем случае импедансы $z_{м}$ и z_i соизмеримы. Величина z_i может быть уменьшена путем использования резонансных режимов работы приемных преобразователей. Пользуясь схемой рис. 47, определим коэффициент усиления по напряжению:

$$\dot{K}_U = \frac{\dot{U}_{вых}}{\dot{U}_{вх}} = \frac{\dot{U}_{вых}}{\dot{U}_Г} \frac{z_i + z_1}{z_1}, \quad (30)$$

где $z_1 = z_{вх}z_{м}/(z_{вх} + z_{м})$ — импеданс, образованный параллельно соединительными элементами $z_{вх}$ и $z_{м}$. На практике обычно $|z_{вх}| \gg |z_{м}|$, и формула (30) приобретает вид

$$\dot{K}_U = \frac{\dot{U}_{вых}}{\dot{U}_Г} \frac{z_i + z_{м}}{z_{м}}. \quad (31)$$

В случае усиления по току входная цепь оказывается в режиме, близком к короткому замыканию. Это достигается применением входного усилительного каскада на обычном биполярном транзисторе, включенном по схеме с общей базой, у которого $|z_{вх}| < 20 \div 30$ Ом. У транзисторных усилителей тока с параллельной отрицательной обратной связью по току $|z_{вх}|$ может достигать 0,1 Ом [56], и поэтому легко выполняются условия $|z_{вх}| \ll |z_{м}|$ и $|z_{вх}| \ll |z_i|$. В этом случае коэффициент усиления по току

$$\dot{K}_I = \frac{\dot{U}_{вых}}{\dot{U}_Г} \frac{z_i}{z_{вых}}. \quad (32)$$

Положив величины $\dot{U}_{вых}$ и $\dot{U}_Г$ одинаковыми в обоих рассматриваемых случаях, найдем отношение выражений (31) и (32):

$$\dot{N} = \frac{\dot{K}_U}{\dot{K}_I} = \frac{z_{вых}}{z_2}. \quad (33)$$

Здесь $z_2 = z_i z_{м}/(z_i + z_{м})$ — импеданс, образованный параллельно соединенными элементами z_i и $z_{м}$. В частном случае, когда $z_{м} \gg z_i$

$$N = \frac{z_{вых}}{z_i}. \quad (34)$$

Формулы (33) и (34) позволяют оценить, какой из рассмотренных способов усиления предпочтительнее. Для практических расчетов по этим формулам необходимо перейти от комплексных величин к их модулям. Очевидно, что при $N = |N| > 1$ выгоднее применение усилителя тока, а при $N = |N| < 1$ — усилителя напряжения.

Величина $z_{\text{вых}}$ как в ламповых, так и в транзисторных усилителях определяется необходимыми полосой пропускания и динамическим диапазоном и составляет обычно единицы — десятки килоом.

В качестве первого примера рассмотрим импедансный дефектоскоп [39]. Подключенный ко входу его усилителя измерительный пьезоэлемент работает на частотах, много меньших его резонансной частоты, и может рассматриваться как генератор с чисто емкостным внутренним сопротивлением [39] $z_i = 1/j\omega C^T$, где ω — круговая частота; C^T — емкость свободного измерительного пьезоэлемента. Входное активное сопротивление усилителя рассматриваемого дефектоскопа достаточно велико, поэтому $z_m = 1/j\omega C_m$, где C_m — суммарная емкость кабеля и монтажа. В этих условиях $z_2 = 1/j\omega(C_m + C^T)$. Выходной импеданс можно принять чисто активным: $z_{\text{вых}} = R_{\text{вых}}$. Тогда из (33) найдем

$$N = \omega R_{\text{вых}} (C_m + C^T).$$

Подставляя числовые значения $C^T = 500$ пФ, $C_m = 250$ пФ, $R_{\text{вых}} = 33$ кОм, получим, что на низшей рабочей частоте дефектоскопа $f_n = \omega/2\pi = 1$ кГц, $N = 0,156$. На высшей частоте прибора $f_v = 8$ кГц, $N = 1,25$. Таким образом, при низшей частоте предпочтительнее усиление по напряжению, которое оказывается меньше соответствующего усиления по току в $1/0,156 = 6,4$ раза. На высшей частоте выгоднее усиление по току, которое составляет $1/1,25 = 0,8$ требуемого усиления по напряжению.

В целом в усилителе импедансного дефектоскопа выгоднее использовать усиление по напряжению.

Пример, иллюстрирующий преимущество применения усилителя тока в приборах с резонансным пьезопреобразователем на частоты 5—10 МГц с практически активным сопротивлением $z_i = 50$ Ом приведен в работе [24], где показано, что усилитель тока имеет примерно в 20 раз меньшее усиление, чем соответствующий усилитель напряжения.

В качестве третьего примера рассмотрим толстые пьезопреобразователи, работающие на частотах, намного превышающих основные собственные частоты применяемых в них пьезоэлементов. В этом случае, как и в первом примере, внутренний импеданс пьезоэлемента имеет чисто емкостный характер [63, 69]. Толстые преобразователи, используемые, как правило, для излучения ультразвуковых акустических импульсов заданной формы, в режиме приема акустических импульсов принципиально требуют применения усилителей тока с очень малым (единицы ом) входным сопротивлением. Однако, как мы видели, и в смысле требуемого коэффициента усиления эти усилители выгоднее, чем усилители напряжения. Так, при типичном значении емкости таких пьезоэлементов (около 100 пФ), «средней» частоте спектра излучаемых УЗ импульсов 20 МГц и $R_{\text{вых}} = 1,6$ кОм (см. предыдущий параграф) расчет по

формуле (33) дает $N=200$, т. е. усилитель тока имеет в 200 раз меньшее усиление, чем соответствующий усилитель напряжения.

Проведенный анализ показывает, что в большинстве случаев в УЗ аппаратуре целесообразнее использовать усилители тока с малым входным сопротивлением, а не усилители напряжения. Дополнительными преимуществами усилителей тока являются меньший уровень наводок на входную цепь (связанный с низким ее импедансом) и легкость реализации режимов, приближающихся к короткому замыканию преобразователя, по сравнению с получением режима, приближающегося к холостому ходу в транзисторных усилителях напряжения. Последнее объясняется тем, что транзисторные усилители с общей базой легко могут быть выполнены с весьма малым входным сопротивлением, которое оказывается много меньшим импедансов соединительных кабелей даже при относительно больших длинах и высоких частотах. Иногда это исключает необходимость размещения первого усилительного каскада в непосредственной близости от преобразователя.

РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ЭХО-ИМПУЛЬСНЫХ ТОЛЩИНОМЕРОВ С АПЕРИОДИЧЕСКИМИ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

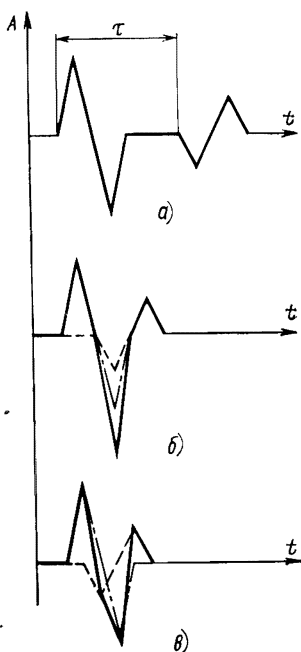


Рис. 48. К определению разрешающей способности эхо-импульсных приборов

Разрешающей способностью эхо-импульсной ультразвуковой аппаратуры по глубине (дальности) называют минимальное расстояние d_{\min} между дефектами или между дефектом и поверхностью ввода УЗ колебаний или в частном случае эхо-импульсных толщиномеров — между поверхностью ввода и противоположной поверхностью изделия, при котором удается четко различать и регистрировать отраженные от них импульсы. Разрешающую способность определяют из известного выражения $d_{\min} = \tau c / 2$, где τ — временной интервал между парой рядом стоящих эхо-импульсов (рис. 48), c — скорость распространения УЗ колебаний в материале контролируемого изделия.

При иммерсионном варианте эхо-метода дефектоскопии и толщинометрии импульсы УЗ колебаний, отраженные от дефекта или внутренней (по отношению к преобразователю) поверхности контролируемого изделия, как правило, имеют фазу (полярность), отличающуюся на 180° от фазы (полярности) импульсов, отраженных от поверхности ввода УЗ колебаний [7, 12, 61]. Исключение составляют редкие случаи, когда выявляемые дефекты, например ме-

таллические включения, имеют акустическое сопротивление, большее акустического сопротивления основного материала изделия, или при измерении толщины, когда измеряемый, например, плакирующий слой граничит со стороны, противоположной поверхности ввода УЗ колебаний, с материалом, имеющим большее, чем у него, акустическое сопротивление.

Временной интервал τ берут таким, чтобы та часть эхо-импульсов которая используется для запуска регистрирующих и измерительных устройств (положительные полуволны на рис. 48, а) не искажались в результате интерференции этих импульсов ни по амплитуде (масштабу), ни по форме (рис. 48, б) или хотя бы только по амплитуде (рис. 48, в). Первый случай относится, например, к эхо-импульсным толщиномерам, где недопустимо изменение формы и соотношения амплитуд импульсов, если требуется высокая точность измерений [31]. При этом разрешающая способность прибора определяется длительностью одной полуволны акустического импульса (рис. 48, б).

Второй случай относится к дефектоскопам, например, при контроле отслоений, когда необходимо сохранить неизменной только амплитуду импульса, отраженного от отслоения. В этом случае (рис. 48, в) разрешающая способность прибора определяется длительностью лишь четверти волны одноволнового акустического импульса.

Таким образом, при использовании, например, электроакустического тракта, описанного в параграфе 4 настоящей главы, разрешающая способность в иммерсионном толщиномере при длительности импульса 50 нс составляет по стали и алюминию приблизительно 70—80 мкм, а для дефектоскопов 35—40 мкм. При использовании в генераторе специальных кремниевых эпитаксиальных лавинных транзисторов, удавалось [19] формировать акустические импульсы в виде одного периода синусоиды длительностью 10 нс и измерять толщины плакирующих покрытий из нержавеющей стали на алюминии до 15 мкм с погрешностью 1,5—2%.

В тех случаях, когда акустические импульсы, отраженные от дефектов, не изменяются по фазе (полярности), можно использовать однополярные зондирующие импульсы, для чего из схемы, приведенной на рис. 38, достаточно удалить формирующий кабель ЛЗ. При этом разрешающая способность прибора будет ограничена всей длительностью зондирующего импульса, которая, например, в схеме, показанной на рис. 38, равна 25 нс. Следует, однако, помнить, что в случае использования однополярных акустических импульсов в спектре принимаемых и усиливаемых сигналов содержится большое число низкочастотных акустических помех (см. рис. 32). Поэтому в приемном тракте необходимо предусматривать специальные фильтры, подавляющие низкочастотные колебания.

На практике применение электронных фильтров усложняет аппаратуру и к тому же позволяет, как правило, подавить низкочастотные помехи не более, чем в 10—20 раз при еще допустимом искажении формы полезного однополярного эхо-импульса, в спектре которого также присутствуют низкие частоты вплоть до постоянной составляющей. Поэтому представляется более целесообразным в практических разработках использовать двуполярные акустические импульсы.

В контактных преобразователях с твердотельной ультразвуковой линией задержки первый эхо-импульс получают от границы

раздела линии задержки — слой контактной смазки. Этот импульс при достаточно малой толщине слоя считают отраженным от внешней по отношению к преобразователю поверхности измеряемого изделия. Второй эхо-импульс получают от внутренней поверхности изделия. Как правило, эти эхо-импульсы имеют одинаковую фазу (полярность), так как и тот и другой отражаются от границ раздела двух сред, попадая на нее из среды с большим акустическим сопротивлением. Таким образом, разрешающую способность контактных эхо-импульсных толщиномеров определяет полная длительность одноволнового акустического зондирующего импульса.

СОВРЕМЕННЫЕ ЭХО-ИМПУЛЬСНЫЕ ТОЛЩИНОМЕРЫ

1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭХО-ИМПУЛЬСНЫХ ТОЛЩИНОМЕРОВ

В настоящее время эхо-импульсные толщиномеры практически полностью вытеснили резонансные, основным преимуществом которых до недавнего времени была возможность измерения малых (до десятых долей миллиметра) толщин с погрешностью 1—2%. С помощью современных эхо-импульсных толщиномеров можно измерять толщины изделий из любых металлов, керамики, пластмасс и т. д. в диапазоне от 0,1 мм до нескольких метров с параметром шероховатости поверхности до $Rz=320$ и хуже, клиновидные изделия с углом клина до 10—15°, изделия с криволинейной поверхностью с радиусом кривизны до 5—10 мм. Погрешность эхо-импульсных толщиномеров при работе по грубой и корродированной поверхности лежит обычно в пределах 0,1—0,2 мм, а минимальная толщина, доступная измерению, составляет 1—1,5 мм. Минимальная толщина измеряемых изделий при параметре шероховатости поверхности $Rz=20$ и выше и радиусах кривизны не менее 100 мм лежит в пределах 0,1—0,2 мм при погрешности измерений 1—3%.

Интересно отметить, что в последнее время контактные ручные толщиномеры, имеющие аналоговый или цифровой выход для записи результатов на самописце или цифropoleчающем устройстве, начинают широко использовать для автоматического контроля. Раздельно-совмещенные пьезопреобразователи устанавливаются при этом на расстоянии 0,3—1 мм от поверхности контролируемого изделия, и акустический контакт осуществляется через слой жидкости (как правило, воды), постоянно подливаемой в зазор между преобразователем и изделием [2].

В табл. 2 приведены краткие технические характеристики современных эхо-импульсных толщиномеров. Буквой С обозначены совмещенные и Р-С — раздельно-совмещенные пьезопреобразователи.

2. ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕРЫ ПОСТРОЕНИЯ ЭХО-ИМПУЛЬСНЫХ ТОЛЩИНОМЕРОВ

Рассмотрим на трех примерах приборов подход к построению принципиальных электронных схем современных эхо-импульсных толщиномеров.

На рис. 49 показана блок-схема контактного ручного толщиномера «Кварц-5» [58], отличающегося от широкоизвестного «Кварц-6» только отсутствием преобразователя постоянного напряжения для

Характеристики отечественных эхо-импульсных толщиномеров

Тип прибора	Год разработки	Диапазон измеряемых толщин, мм	Погрешность измерений	Тип индикатора	Тип используемых преобразователей	Габаритные размеры, мм	Масса, кг	Питание
«Кварц-6»	1970	2—10 2—25 2—50	$\pm 0,15$ мм $\pm 0,3$ мм $\pm 0,6$ мм	Стрелочный	Р-С	250×195×195	4,5	Батарейное
УТ-30К	1973	0,25—1 1—10 10—99,9	2,5% 1,5% 1,5% измеряемой величины	Цифровой	С	100×311×315	9,2	Сетевое
УП-30ПЦ	1974	0,25—1 1—10 10—100	3% измеряемой величины	»	С и Р-С	280×210×135	5,5	Универсальное
УТ-90П («Кварц-14»)	1975	1,2—10 10—99,9	$\pm 0,2$ мм $\pm 0,15$ мм	»	Р-С	180×105×160	3	»
УТ-31МЦ	1975	0,1—5 5—300	— 1—5% измеряемой величины	»	С и Р-С	210×110×36	0,65	»
УТ-40СЦ	1976	5—100 (для пластмасс)	3% измеряемой величины	»	Р-С]	210×110×36	0,65	Универсальное
«Металл-6)	1975	0,25—1 1—10 10—60	$\pm(1\% \pm 3 \text{ мкм})$ $\pm(1\% \pm 10 \text{ мкм})$ $\pm(1\% \pm 0,1 \text{ мм})$	Цифровой, ЭЛТ, автоматический сигнализатор, самописец	С	480×158×480	20	Сетевое
УП-91П («кварц-15»)	1977	1,2—10 10—200	0,2 мм 0,1—2,1 мм	Цифровой	Р-С	62×172×170	2	Батарейное

питания прибора от низковольтных батарей. Работает прибор следующим образом. Синхронизатор 1 запускает генератор 2, возбуждающий излучающий пьезоэлемент радельно-совмещенного пьезопреобразователя 3. Излучающий пьезоэлемент генерирует УЗ колебания, которые через призму преобразователя, установленного на поверхности измеряемого изделия, и слой контактной смазки вводятся в изделие. Распространяясь в материале изделия, УЗ колебания отражаются от его внутренней поверхности и попадают на приемный пьезоэлемент, где преобразуются в электрические колебания, поступающие на вход усилителя 4.

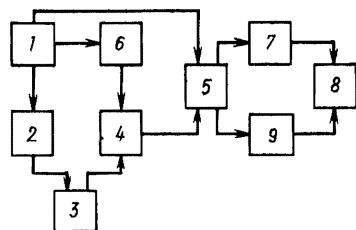


Рис. 49. Блок-схема толщиномера «Кварц-5»

В момент запуска генератора импульсов синхронизатор устанавливает триггер 5 в исходное состояние; сигнал с выхода усилителя переводит триггер в другое устойчивое состояние. Таким образом, на выходе триггера формируется прямоугольный импульс, длительность которого равна интервалу времени прохождения УЗ импульса от излучающего пьезоэлемента через призмы и измеряемое изделие до приемного пьезоэлемента. Изменение толщины измеряемого изделия приводит к изменению длительности импульса на выходе измерительного триггера. Стробующее устройство 6, запускаемое синхронизатором, предотвращает попадание электрической и акустической наводок импульсов возбуждающего генератора на вход усилителя 4.

Измерительный триггер управляет ключом-формирователем 7, пропускающим ток через микроамперметр 8 во время действия импульса. Микроамперметр включен между ключом-формирователем и схемой компенсации 9 таким образом, что постоянная составляющая тока схемы компенсации, протекающего через микроамперметр, компенсирует ту часть постоянной составляющей тока ключа-формирователя, которая определяется временем прохождения УЗ импульсов по обоим призмам пьезопреобразователя и слою контактной смазки.

При этом ток, протекающий через микроамперметр, прямо пропорционален времени прохождения УЗ колебаний не по призмам и изделию, а только по измеряемому изделию, т. е. толщине последнего. Это позволяет калибровать шкалу прибора в единицах толщины.

Принципиальная схема прибора показана на рис. 50. Синхронизатор представляет собой автоколебательный мультивибратор (T_5 , T_6 — МП42Б, T_7 — КТ301В) с эмиттерным повторителем и формирователем (T_8 , T_9 — П416Б). Мультивибратор отличается повышенной стабильностью частоты следования, что достигается применением мостовой времязадающей цепочки и дифференциального каскада на входе. Это позволяет снизить погрешность прибора и обеспечить стабильность его калибровки в течение длительного интервала времени.

Генератор, возбуждающий пьезопреобразователь, состоит из формирователя (T_4 — КТ602Б) и составного эмиттерного повторителя

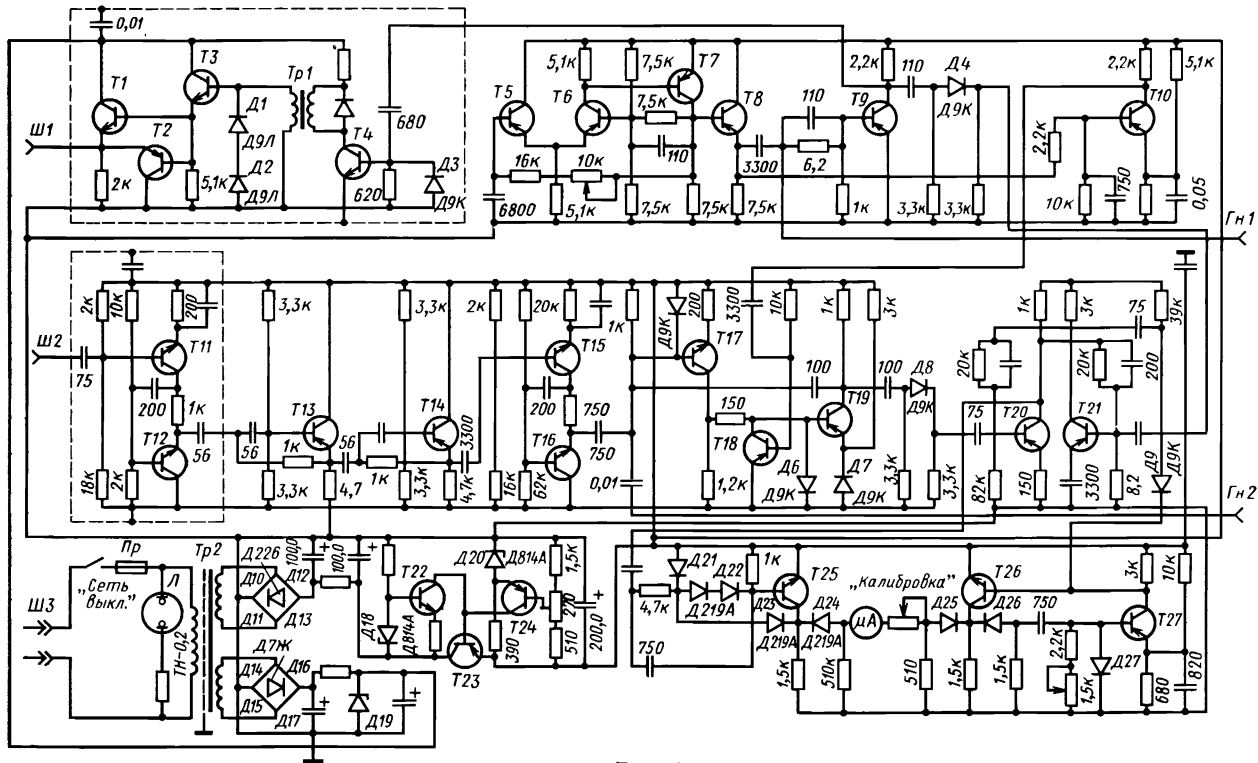


Рис. 50. Принципиальная схема толщиномера «Кварц-5»

тёла на транзисторах $T1$ (КТ602Б) и $T3$ (КТ601А). Транзистор $T2$ (МП26Б) ускоряет разряд емкости излучающего пьезоэлемента. Диоды $D1$, $D2$ предотвращают пробой $T3$ выбросами тока противоположной полярности на вторичной обмотке трансформатора. Генератор формирует на излучающем пьезоэлементе импульсы напряжения длительностью 1,5 мкс с передним фронтом 150—180 нс и амплитудой 95 В.

Усилитель состоит из двух каскадов на транзисторах $T11$, $T12$ и $T15$, $T16$ (ГТ311И), выполненных по каскадной схеме. Между этими каскадами включен активный фильтр нижних частот на транзисторах $T13$, $T14$ (П416Б). На выходе усилителя имеется формирователь импульсов запуска триггера, выполненный на транзисторах $T17$ (КТ301В) и $T19$ (П416Б). Коэффициент усиления усилителя более $5 \cdot 10^3$ на частоте 5 МГц.

Измерительный триггер выполнен на транзисторах $T20$, $T21$ (П416Б).

Ключевая схема представляет собой ненасыщенный ключ на транзисторе $T25$ (ГТ311И).

Схемой компенсации служит одновибратор с регулируемой длительностью импульса, собранный на транзисторах $T26$ (ГТ311И) и $T27$ (П416Б).

Стробующее устройство состоит из формирователя на транзисторе $T10$ (МП20А) и временного селектора $T18$ (П416Б).

Выходные напряжения блока питания: -10 и $+100$ В. Кроме описанных выше в приборе применены транзисторы: $T4$ — КТ602Б; $T24$ — МП20А; $T22$ — МП11; $T23$ — ГТ403А.

Описанный толщиномер «Кварц-5» имеет следующие основные характеристики: диапазон измеряемых толщин (по стали) 2—10 мм; погрешность измерений $\pm 0,1$ мм при радиусе кривизны поверхности измеряемых изделий более 20 мм и чистоте поверхности не хуже $Rz=40$; указанная погрешность сохраняется при непараллельности поверхностей контролируемого изделия до 10%; габаритные размеры $250 \times 165 \times 100$ мм; масса 2,8 кг. Прибор потребляет от сети переменного тока напряжением 220 В мощность 3 Вт.

Остановимся более подробно на описании схемы одного из самых современных контактных ультразвуковых эхо-импульсных толщиномеров УТ-31МЦ [35]. При габаритах карманного радиоприемника и массе немногим более полукилограмма прибор позволяет измерять толщины изделий из металлов, керамики и некоторых видов пластмасс в диапазоне от 0,1 до 300 мм с реальной погрешностью менее 1—2% во всем диапазоне (2—5% по техническим условиям).

На рис. 51 приведена принципиальная схема прибора; на рис. 52 — временная диаграмма, поясняющая его работу.

Задающий блокинг-генератор $T18$ (рис. 51) запускает (эпюра 1, рис. 52) генератор $D23$ двуполярных зондирующих импульсов (эпюра 2) длительностью 40 нс, расположенный в выносной искательной головке (см. рис. 46), предназначенной для работы с апериодическим пьезопреобразователем, описанным в гл. II. Схема включения апериодического пьезопреобразователя, выходные цепи генератора и диодный ограничитель тока между генератором и усилителем эхо-сигналов аналогичны описанным в параграфе 4 гл. II. С выхода искательной головки эхо-сигналы, отраженные от внутренней и внешней поверхностей измеряемого изделия, поступают на вход широкополосного усилителя импульсов тока $T1$ — $T4$, который находится в корпусе прибора, а не в выносной головке, как в приборах

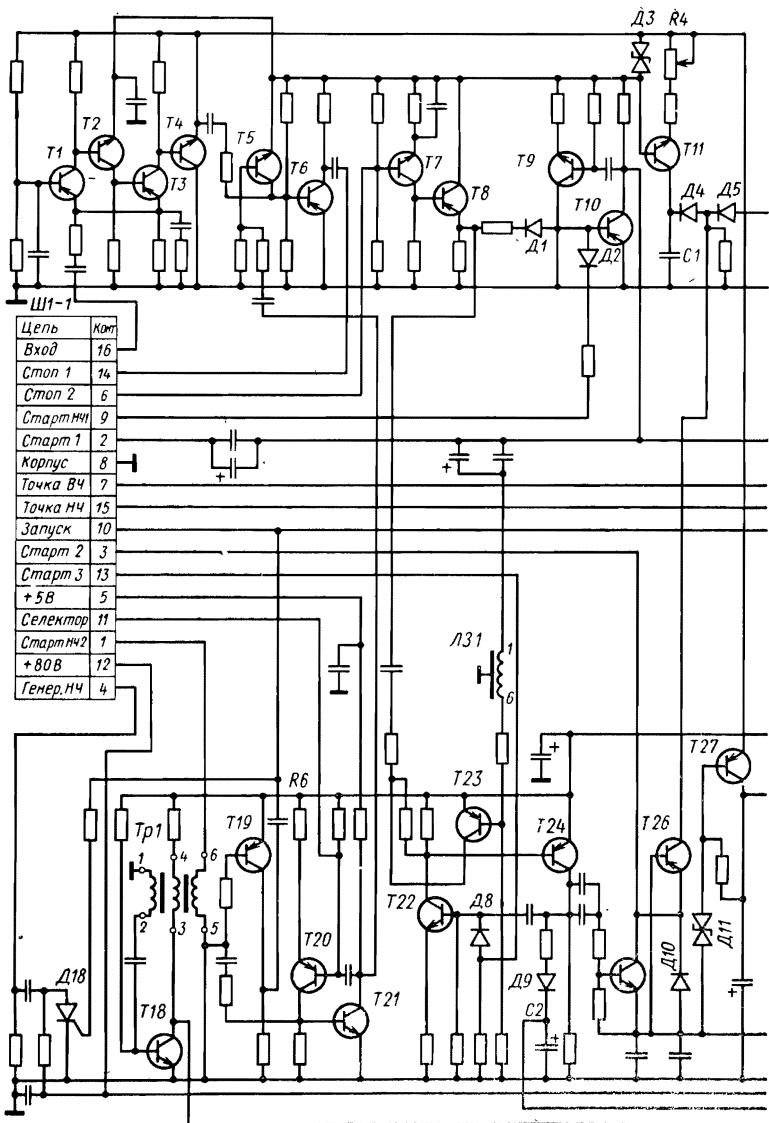
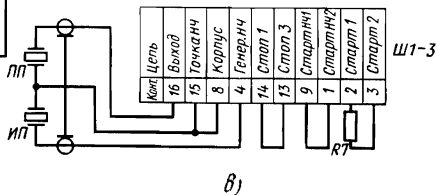
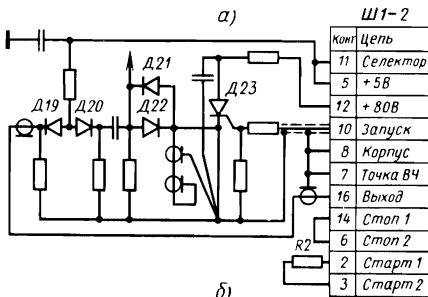
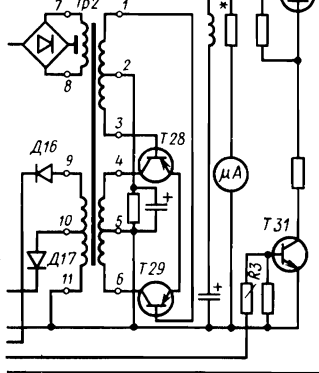
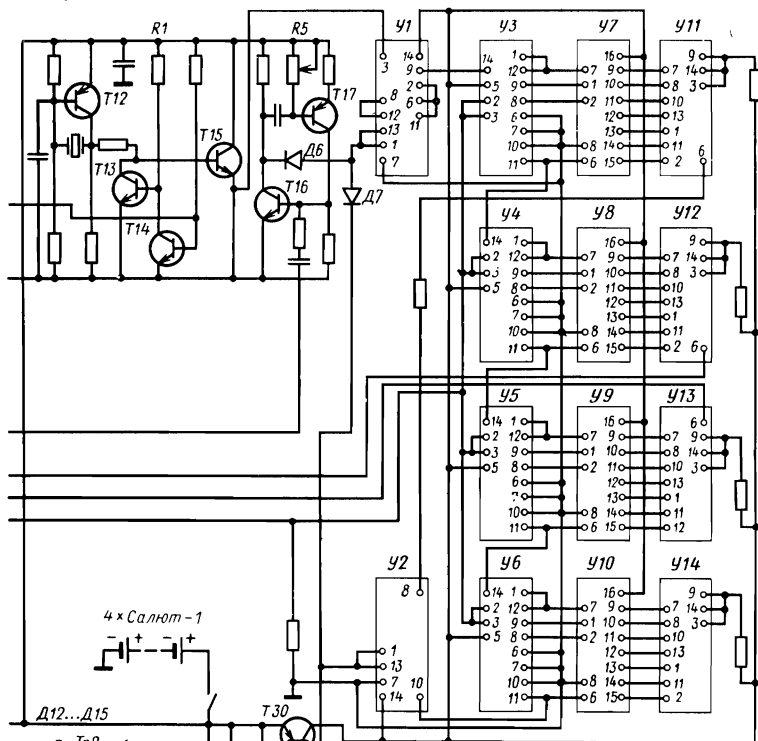


Рис. 51. Принципиальная схема толщиномера УТ-31МЦ:

а — измерительная схема; *б* — искалтельная головка с аперийодическим пьезо дельно-совмещенным пьезопреобразователем. Транзисторы: *T1*—КТ310Б; *T2*, *T23* — КТ363А; *T4*—КТ368Б; *T5*, *T6*, *T14*, *T16*, *T25*, *T31*—КТ342В; *T10*, *T17*, *T11* — КТ342Г; *T12*, *T24*, *T27* — КТ361Б; *T13*, *T21*, *T15*, *T16*, *T22* — КТ315Б; *T26* — Д6 — Д11, Д12 — Д15, Д19 — Д22 — КД513А; Д3 — КС162А; Д4, Д5 — КД521А; КД102А. Тиристоры: Д18, Д23 — КУ104Г. Микросхемы: У1, У2 — К1ТК552; К514ИД2; У11 — У14 — АЛ305А; линия задержки ЛЗС — 0,05—600; индикатор



преобразователем; в — с раз-
 Т7, Т9 — КТ316Б; Т3, Т8,
 Т19, Т20, Т28—Т30 — КТ345В;
 КТ203А. Диоды: Д1, Д2,
 Д13 — КС213Б; Д19, Д17 —
 У3—У6—К155ИЕ2; У7—У10—
 напряжения питания—М473/3

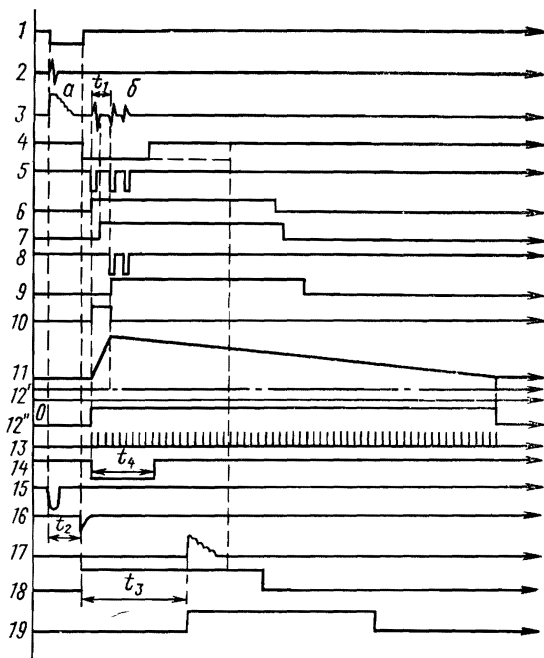


Рис. 52. Временная диаграмма, иллюстрирующая работу прибора. Эпюры напряжений и токов:

1 — на коллекторе $T16$; 2 — на катоде тиристора $D18$; 3 — на эмиттере $T4$; 4 — на коллекторе $T21$; 5 — на эмиттере $T8$; 6 — на коллекторе $T10$; 7 — на базе $T23$; 8 — на коллекторе $T23$; 9 — на коллекторе $T24$; 10 — ток в цепи коллектора $T26$; 11 — на коллекторе $T11$; 12 — положительный ток в базе $T14$; 12⁰ — отрицательный ток в базе $T14$; 13 — на эмиттере $T15$; 14 — на коллекторе $T16$; 15 — на выходе генератора $D23$; 16 — ток через диод $D2$; 17 — на эмиттере $T6$ при работе с раздельно-совмещенными пьезопреобразователями; 18 и 19 — на коллекторах $T10$ и $T24$ соответственно при работе с раздельно-совмещенными пьезопреобразователями

УТ-30К и УТ-30ПЦ (см. рис. 42). Это позволило резко сократить размеры и массу искательной головки.

С выхода усилителя полезные эхо-сигналы (эпюра 3б) и неизбежный импульс электрической наводки (эпюра 3а) генератора зондирующих импульсов поступают на вход временного селектора $T5$, которым управляет одновибратор $T19, T20$, определяющий интервал пропускания селектора (эпюра 4). Временная задержка осуществляется задающим блокинг-генератором $T18$ (эпюра 1). На выход селектора проходят только полезные эхо-сигналы, которые после нормализации по амплитуде усилителем-ограничителем $T6-T8$ (эпюра 5) поступают на измерительную схему прибора, представляющую

с собой прецизионный измеритель временных интервалов с цифровой индикацией.

Измеритель временных интервалов работает следующим образом. Первый из нормализованных импульсов (эпюра 5) запускает через диод $D1$ одновибратор «Старт» ($T9, T10$), задающий в эмиттер повторителя тока $T26$ импульс тока (эпюра 6) амплитудой порядка 120 мА. Длительность импульсов, формируемых одновибратором «Старт», выбирается на 30—50% большей временного интервала между эхо-импульсами от поверхностей измеряемого изделия с наибольшей толщиной, на которую рассчитан прибор.

Те же нормализованные импульсы (эпюра 5) поступают с эмиттера $T8$ на вход одновибратора «Стоп» ($T22, T24$). Однако запускается этот одновибратор только вторым импульсом из серии, показанной на эпюре 5, так как транзистор $T23$ в статическом состоянии насыщен и шунтирует вход запуска одновибратора $T22, T24$. Запирается $T23$ импульсом одновибратора «Старт», задержанным (эпюра 7) линией задержки $L31$ на время 50 нс, несколько большее длительности зондирующего импульса. Поэтому одновибратор $T22, T24$ запускается только вторым импульсом (эпюра 8) из серии нормализованных эхо-импульсов.

С выхода одновибратора «Стоп» импульс (эпюра 9), длительность которого должна быть большей или равной длительности импульса одновибратора «Старт», открывает транзистор $T25$. С этого момента весь ток, создаваемый одновибратором «Старт» в эмиттере $T26$, переключается в коллектор $T25$. Таким образом, в коллекторе повторителя тока $T26$ формируется импульс тока (эпюра 10) амплитудой порядка 120 мА и длительностью, равной измеряемому временному интервалу между эхо-импульсами (эпюра 3, 5).

Амплитуда тока определяется стабилизированной амплитудой импульсов напряжения, формируемых одновибратором «Старт» ($T9, T10$) и сопротивлением резистора, включенного в искательной головке (рис. 51, б) между контактами 2 и 3 разъема $Ш1-2$ и замыкающего цепь коллектора $T10$ и эмиттера $T26$. Электрический заряд, переносимый этим импульсом тока (эпюра 10) равен произведению тока в этом импульсе на его длительность, пропорциональную измеряемой толщине. Длительность этого импульса в приборе изменяется от 50 нс до 100 мкс, что соответствует диапазону измеряемых толщин (по стали) примерно 0,1—300 мм.

Заряд, переносимый импульсом тока (эпюра 10), линейно преобразуется в импульсы тока, длительность которых на несколько порядков превышает длительность импульсов в коллекторе $T26$. Это позволяет резко снизить (до 5 МГц) частоту следования импульсов, которыми заполняется измеряемый временной интервал. Число этих импульсов, определяемое электронным счетчиком, пропорционально измеряемому интервалу, что и обеспечивает его точное измерение.

Линейный преобразователь заряда во временной интервал состоит из генератора импульсов тока $T26$, генератора постоянного тока $T11$ и ключа $T13, T14$. В отсутствие импульсов тока в коллекторе $T26$ диоды $D4$ и $D5$ открыты постоянным током, генерируемым транзистором $T11$. Этот ток создает на базе $T14$ запирающий отрицательный потенциал. В базу этого же транзистора резистором $R1$ задается и положительный ток. Однако элементы схемы выбраны таким образом, что этот ток всегда несколько меньше отрицательного тока генератора $T11$, и поэтому $T14$ закрыт.

Положительный импульс тока из коллектора $T26$ запирает диод $D5$ и через диод $D4$ линейно заряжает конденсатор $C1$ в цепи коллектора $T11$ (эпюра 11). В момент появления импульса тока в коллекторе $T26$ (эпюра 10) практически до нуля падает отрицательный ток в цепи базы $T14$ (эпюра $12''$) и постоянный положительный ток (эпюра $12'$) открывает транзистор $T14$. После исчезновения положительного импульса тока конденсатор $C1$ начинает линейно разряжаться постоянным током генератора $T11$. До практически полного разряда конденсатора $C1$ диоды $D4$ и $D5$ остаются запертыми. По окончании разряда конденсатора $C1$ снова открываются диоды $D4$, $D5$ и отрицательным током $T11$ запирается транзистор $T14$. Таким образом, в базе $T14$ формируется импульс положительного тока, длительность которого примерно в 10^3 — 10^4 раз больше длительности положительного импульса тока в коллекторе $T26$, т. е. больше измеряемого интервала. Линейный заряд и разряд емкости $C1$ устанавливает линейную связь длительностей этих импульсов.

Во время действия положительного тока в базе $T14$ транзистор $T13$ заперт и через резистор в его коллекторе с кварцевого генератора $T12$ через эмиттерный повторитель $T15$ беспрепятственно проходит на вход пересчетной схемы $У1$, $У3$ — $У14$ последовательность импульсов (эпюра 13), число которых пропорционально длительности измеряемого временного интервала. Двойной триггер $У1$ осуществляет деление на четыре числа этих импульсов, поступающих затем на счетную схему. Это резко сокращает неопределенность числа этих импульсов, обусловленную несинхронностью работы кварцевого генератора $T12$ по отношению к моментам переключения транзисторов $T13$, $T14$ [33].

Особенностью толщиномера является то, что в нем применен четырехдекадный счетчик, где каждая из четырех соединенных последовательно декад состоит всего из трех микросхем: собственно счетчика $У3$ — $У6$, дешифратора $У7$ — $У10$ и светодиодного цифрового индикатора $У11$ — $У14$.

В приборе имеется два основных поддиапазона измерений: 0 — 10 и 0 — 300 мм. Искательная головка, рассчитанная на применение аperiodического пьезопреобразователя с генератором зондирующих импульсов на тиристоре $D23$ (см. рис. 51, 6), предназначена для измерений в диапазоне толщин $0,1$ — 10 мм. В разьеме $Ш1-2$ предусмотрено замыкание на корпус (контакты 7, 8) вывода запятой (и соответственно ее свечение) в третьей декаде счетчика $У13$. В этом случае цифровой индикатор градуирован в миллиметрах. Сопrotивление резистора $R2$ в разьеме $Ш1-2$ выбрано таким, что при временном интервале между эхо-импульсами, соответствующем толщине 10 мм (концу первого поддиапазона), длительность цуга импульсов на входе триггера $У1$ (эпюра 13) с учетом того, что частота работы кварцевого генератора 5 МГц, равна 8 мс. После деления числа этих импульсов на четыре триггерами $У1$ на вход счетчика поступает 10^4 импульсов и он оказывается заполненным. При переполнении счетчика (толщина больше 10 мм) импульс с выхода последней декады $У6$ переключает триггер $У2$, включающий ненужную в других случаях запятую в первом разряде счетчика ($У11$, вывод 6), указывая на перегрузку счетчика. Сброс счетчика осуществляется импульсами напряжения положительной полярности с коллектора фазоинвертора $T19$, а сброс триггеров $У1$ и $У2$ — отрицательными импульсами с коллектора $T18$ в блокинг-генераторе.

Вся пересчетная схема У1—У14 в среднем потребляет ток от 100 до 300 мА, поэтому включать ее питание целесообразно только на время измерений; тогда ток, потребляемый прибором в режиме отсутствия измерений, составляет всего 170—180 мА. Осуществляется это автоматически следующим образом. Импульсы на выходе одновибратора «Стоп» (коллектор Т24) появляются только при контакте пьезопреобразователя с измеряемым изделием, т. е. только при наличии эхо-импульсов на выходе усилителя Т1—Т4 (эюра 3 на рис. 52). С помощью диода Д9 и емкости С2 импульсы одновибратора «Стоп» затягиваются до постоянного напряжения, которым через резистор R3 открываются транзистор Т31 и затем запертый до этого транзистор Т30. Последний замыкает цепь питания пересчетной схемы с положительным электродом батареи питания. После снятия датчика с измеряемого изделия цифровой индикатор гаснет.

Калибровка прибора при измерении изделий с различными скоростями распространения УЗ колебаний выполняется потенциометром R4, регулирующим время разряда конденсатора С1. Это позволяет устанавливать в конце шкалы прибора длительность импульса на базе Т14, равную 8 мс, что обеспечивает, в свою очередь, заполнение пересчетной схемы. С помощью R4 осуществляется калибровка прибора на материалах со скоростью распространения УЗ колебаний от 4100 до 6500 м/с.

Для измерения толщин более 10 мм используют раздельно-совмещенные пьезопреобразователи на частоту 2,5 МГц (рис. 51, в). Генератор зондирующих импульсов отрицательной полярности (см. рис. 52, эюра 15) для возбуждения излучающей пьезопластины ИП раздельно-совмещенного преобразователя выполнен на тиристоре Д18. Эхо-импульсы, отраженные от внутренней поверхности измеряемого изделия (эюра 17), поступают с приемной пьезопластины ПП на тот же усилитель импульсов тока Т1—Т4 и через временной селектор Т5 и эмиттерный повторитель Т6 на вход запуска (Д8) одновибратора «Стоп» (эюра 19). Как уже говорилось, временным селектором Т5 управляет одновибратор Т20, Т21. Чтобы исключить прохождение через селектор импульсов, многократно отраженных в УЗ линии задержки апериодического пьезопреобразователя [29], длительность импульса одновибратора выбирается небольшой (около 5 мкс). Для этого резистор R6 в базе Т20 замыкается практически накоротко через контакты 11, 5 в разъеме Ш1-2. При использовании раздельно-совмещенных пьезопреобразователей R6 не шунтируется и одновибратор формирует импульсы длительностью 150 мкс (штриховая линия на эюре 4), что обеспечивает пропускание селектором эхо-сигналов (эюра 17) при толщинах до 300—400 мм.

Одновибратор «Старт» запускается задним фронтом импульса блокинг-генератора Т18 (эюры 16, 18), снимаемым со вторичной обмотки трансформатора Тр1 (вывод 6), соединенной через контакты 1, 9 разъемов Ш1-1 и Ш1-3 с диодом Д2. Дальнейшая работа измерительного тракта прибора аналогична описанной выше для диапазона толщин до 10 мм, только резистор R7 в разъеме Ш1-3, задающий ток заряда конденсатора С1, имеет сопротивление примерно в 100 раз большее, чем для диапазона 0—10 мм.

В приборе имеется еще одна ручка управления, предназначенная для калибровки начала шкалы отсчета показаний. При использовании апериодического пьезопреобразователя временные интервалы измеряются между положительными полуволнами эхо-импульсов

(эпюры 3, 5), имсющими разную фазу в том смысле, что первый из них начинается с положительной полуволны, а второй и последующие — с отрицательной. Это, как легко видеть из эпюр 3 и 5, приводит к тому, что временной интервал t_1 между первой парой импульсов на эпюре 5 больше интервалов между следующими импульсами на постоянную величину, равную половине их длительности [29]. В случае использования раздельно-совмещенных пьезопреобразователей, содержащих в конструкции призмы УЗ линии задержки (выполняемые, как правило, из оргстекла [12]), временные интервалы, пропорциональные толщине измеряемых изделий, равны разности между суммарным временем распространения УЗ импульсов в призмах и в измеряемом изделии и временем распространения только в призмах. Поскольку время распространения УЗ колебаний в призмах имеет технологический разброс порядка 10—20%, задержка t_2 импульса (эпюра 16), являющегося началом отсчета измеряемых временных интервалов относительно зондирующего импульса, выбрана на 20—30% меньшей времени задержки в призмах пьезопреобразователя.

Таким образом, при измерении толщины с помощью раздельно-совмещенных пьезопреобразователей во временных интервалах t_3 (эпюра 18) есть некоторая постоянная временная прибавка, как и в рассмотренном случае применения апериодического пьезопреобразователя. Следовательно, для нормальной работы прибора из числа импульсов, поступающих на вход пересчетной схемы (эпюра 13), необходимо вычитать постоянное число импульсов, пропорциональное указанным выше постоянным прибавкам во временных интервалах t_1 и t_3 . Осуществляется это следующим образом. В схеме прибора (см. рис. 51) имеется одновибратор $T16, T17$, который по базе транзистора $T16$ запускается передним фронтом импульса одновибратора «Старт» ($T9, T10$) (эпюры 6, 14). После этого $T16$ открывається и через диод $D6$ замыкает на корпус вход сброса триггеров $У1$, прекращая тем самым его работу на время, равное длительности импульса одновибратора $T16, T17$. В этот интервал времени t_4 (эпюра 14) триггеры $У1$ не реагируют на часть входных импульсов (эпюра 13), что и требуется. Время t_4 (или число подсчитываемых счетчиком импульсов) регулируется потенциометром $R5$.

Питание прибора осуществляется от четырех элементов «Салют-1», «Салют-2» или 343 со средним рабочим напряжением приблизительно 5 В. В приборе имеется преобразователь постоянного напряжения ($T28, T29$) на частоту 10—12 кГц с КПД 75—80%. Преобразователь обеспечивает напряжения: —(12÷14) В на выходе стабилизатора $T27, Д11$; +80 и +45 В на выходе $Д16$ и $Д17$ соответственно.

Толщиномер УТ-31МЦ имеет следующие технические характеристики при измерении изделий из материалов со скоростями распространения УЗ колебаний от 4100 до 6500 м/с:

Диапазон измеряемых толщин, мм	0,1—300
Погрешность измерений, % измеряемой толщины	1—2
Диапазон температур окружающей среды, °С . . .	от —10 до +40
Изменение показаний прибора при изменении температуры окружающей среды, %/10°С	0,1—0,2
Средняя продолжительность непрерывной работы прибора с автономным питанием от элементов, ч:	
«Салют-1»	12

«Салют-2»	6
343	3
Питание от сети переменного тока:	
напряжение, В	220
потребляемая мощность, ВА	10—12
Габаритные размеры, мм	210×110×36
Масса прибора с комплектом батарей, кг	0,65

В комплект прибора входят два пьезопреобразователя УЗ колебаний: апериодический и отдельно-совмещенный на 2,5 МГц. Диапазон толщин, измеряемых апериодическим преобразователем 0,1—10 мм, минимальный радиус кривизны измеряемых изделий 100—200 мм, параметр шероховатости поверхности не хуже $Rz=40\div 20$. Диапазоны толщин, измеряемых отдельно-совмещенным пьезопреобразователем 3,5—300 мм; допустимый минимальный радиус кривизны измеряемых изделий 15 мм; минимально допустимый параметр шероховатости поверхностей измеряемых изделий $Rz=320$, допустимая непараллельность поверхностей измеряемых изделий при дополнительной погрешности 1% составляет 15%.

Вся электронная схема, включая цифровые индикаторы, потенциометры $R4$, $R5$ и разъем Ш1-1, собрана на одной печатной плате размером 105×150 мм. Все переключения цепей в приборе осуществляются с помощью миниатюрного шестнадцатиконтактного разъема типа РПМ (см. рис. 51) при смене пьезодатчиков. Это позволяет исключить из прибора такую относительно громоздкую деталь, как галетный переключатель диапазонов. Важной особенностью прибора является наличие всего двух ручек управления. Толщиномер выполнен в прессованном из ударопрочного полистирола корпусе с эластичной капроновой ручкой для ношения его на руке и откидной ножкой для настольной работы (рис. 53).

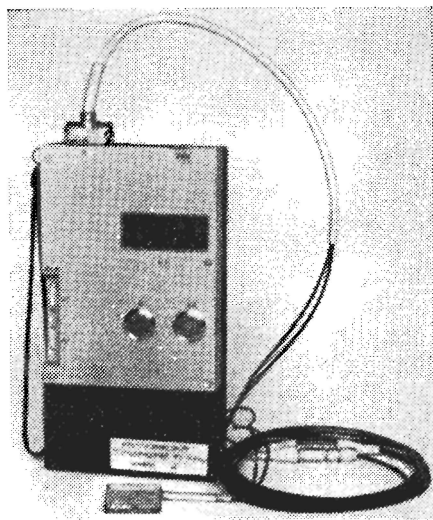


Рис. 53. Внешний вид прибора УТ-31МЦ

На рис. 54 приведена принципиальная схема ультразвукового иммерсионного толщиномера [28], предназначенного для работы в установках полуавтоматического и автоматического контроля отклонения толщины изделий от номинального значения. Прибор снабжен регистрирующим устройством, фиксирующим отклонения толщины за верхний и нижний допуски, и осциллографическим индикатором для облегчения настройки на конкретное изделие.

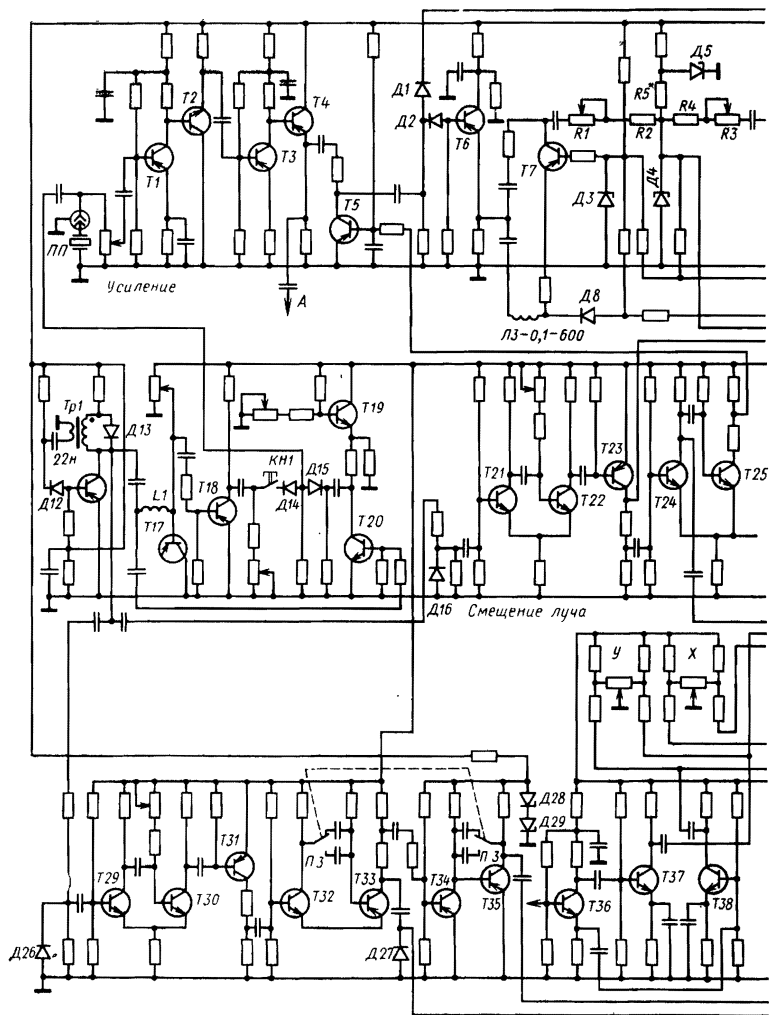
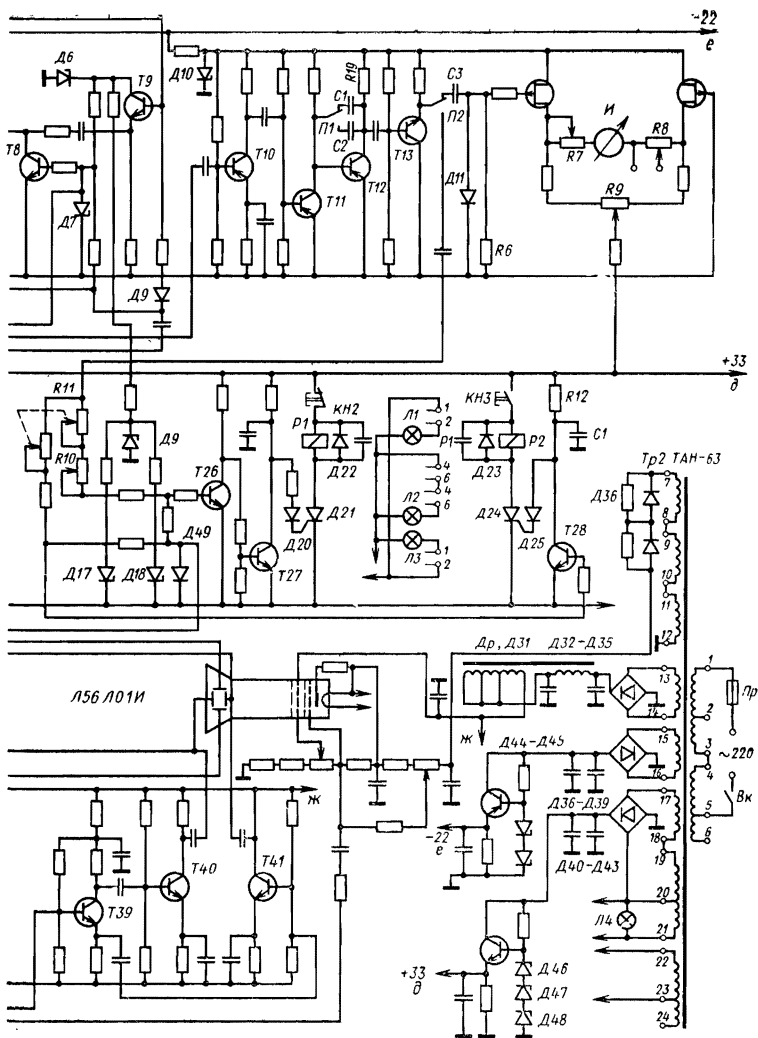


Рис. 54. Принципиальная схема толщиномера:

Транзисторы: $T_1, T_2, T_3, T_6, T_7, T_8, T_9, T_{10}, T_{11}$ —ГТЗ11А; T_{12} —ГТЗ13В; T_{16} —ГТЗ21Б; T_{17} —МП4Б; T_{18}, T_{20} —КТЗ12Б; $T_{19}, T_{21}, T_{22}, T_{24}, T_{25}, T_{36}, T_{39}$ —КТ602Б; $T_{37}, T_{38}, T_{40}, T_{41}$ —КТ605А; T_{24} —П201АЭ; T_{43} —Д5—Д818Е; Д6, Д10, Д44—Д48—Д814Г; Д25—Д9К; Д11—Д219А; Д12, Д13—Д220Б; Д14, Д15—Д310; Д19—Д32—Д35—Д226; Д28, Д29—



Т4, Т34, Т35 — ТТ308В; Т5 — П30; Т13 — КТ301Ж; Т14, Т15 — КП102И;
 Т29, Т30, Т32, Т33 — МП37Б; Т23, Т31 — МП21Г; Т26, Т27, Т28 — КТ301Б;
 КТ805А; диоды: Д1, Д2, Д8 — Д311; Д3, Д4, Д7, Д17, Д18 — АИ301А;
 Д20, Д9, Д16, Д49, Д26,
 Д818Б; Д22, Д23, Д36 — Д43 — Д226Г; Д27,
 Д814А; Д30, Д31 — Д218; Д21, Д24 — КУ101Б

В рассматриваемом толщиномере для укорочения УЗ импульсов использован метод компенсации свободных колебаний пьезоэлемента. Это вызвано тем, что, как видно, например, из выражения (24), коэффициент двойного преобразования пьезопреобразователей как толстых, так и тонких прямо пропорционален квадрату их электрической емкости. Поэтому коэффициент преобразования тонких пьезоэлементов, например, с резонансной частотой 10 МГц примерно в 500 раз выше, чем толстого преобразователя, показанного на рис. 24, 39. Это явилось решающим фактором при разработке данного толщиномера, рассчитанного на контроль особо тонкостенных труб очень малого диаметра (5—15 мм), при котором резко падает амплитуда всех эхо-импульсов, отраженных от их поверхности.

Компенсированный генератор зондирующих импульсов, выполненный на транзисторах Т16-Т20 (рис. 54) [31], возбуждает пьезоэлемент ПП двухступенчатым импульсом напряжения (эюра 1, рис. 55), в результате чего ПП излучает в иммерсионную среду (в частности, в воду) короткие акустические импульсы (эюра 2, рис. 55). Длительность этих зондирующих импульсов составляет примерно один полный период резонансной частоты ПП. В генераторе применены высокочастотные импульсные транзисторы, что позволило возбуждать ПП с резонансной частотой 10—12 МГц. При этом длительность зондирующих импульсов 50—40 нс. В цепочке регулируемой задержки $L1$, $T17$ в качестве переменного конденсатора используется барьерная емкость коллекторного перехода $T17$.

Пьезопреобразователь выполнен из керамики ЦТС-19 с резонансной частотой 10 МГц. С внутренней стороны искательной головки ПП демпфирован столбиком эпоксидной смолы, заполненным мелкими (\varnothing 0,5—1 мм) стальными шариками, на которых за счет рассеяния подавляются ложные эхо-импульсы, отраженные от противоположной пьезопреобразователю стенки демпфера.

Акустические импульсы, отраженные от стенки контролируемого изделия, принимаются тем же ПП, с электродов которого они попадают на вход широкополосного усилителя $T1-T4$. Для обеспечения нормальной работы прибора особое внимание было уделено правильному выбору полосы пропускания усилителя. Это объясняется тем, что усиливаются весьма короткие импульсы и для того, чтобы передать их без искажения, усилитель должен иметь полосу пропускания, большую или равную определенному минимуму. Полоса пропускания усилителя $T1-T4$ выбрана равной 16 МГц ($f_n = 2$; $f_a = 18$ МГц). Коэффициент усиления составляет 350—400.

На выходе усилителя появляется несколько серий эхо-импульсов: $A_1, B_1; A_2, B_2, \dots, A_n, B_n$ (рис. 55, эюра 3). Они являются следствием многократных отражений в иммерсионном столбе эхо-импульсов от передней (A_n) и задней (B_n) границ контролируемого изделия. Временной интервал между импульсами A_n и B_n пропорционален толщине контролируемого изделия d . С учетом эффекта псевдоусиления [31], в результате которого при многократных отражениях в иммерсионном столбе уменьшается отношение амплитуд A_n/B_n , временным селектором $T5$ выделяются импульсы A_2, B_2 (эюра 6). Рис. 56 наглядно иллюстрирует эффект псевдоусиления (с помощью регулировки усиления осциллографа амплитуды импульсов A_2, A_2, \dots, A_n приведены к одному значению). Предполагая что акустический луч имеет форму цилиндра, легко показать, что амплитуда импульса $A_n = A_0 K_{41}^{n-1} K_{12}^n l^{-2n} h_1 \delta_1$, а им-

пульса $B_n = A_0 (1 - K_{12}^2) K_{23} K_{41}^{n-1} \times K_{41}^{n-1} e^{-2h_1 \delta_1} e^{-2d \delta_2}$, где A_0 — амплитуда акустического импульса, первоначально попадающего на поверхность контролируемого изделия; K_{12} — коэффициент отражения по амплитуде давления на границе сред иммерсионная жидкость — материал изделия (внешняя поверхность); K_{23} — то же, на границе с внутренней поверхностью; K_{41} — то же, на границе иммерсионная среда — пьезопреобразователь; h_1 — высота столба иммерсионной жидкости; δ_1 и δ_2 — коэффициенты затухания ультразвука соответственно в иммерсионной среде и в изделии. Отсюда модуль отношения [31]

$$\left| \frac{A_n}{B_n} \right| = \left| \frac{K_{12}}{n (1 - K_{12}^2) K_{23} e^{-2\delta d}} \right|. \quad (35)$$

Временным селектором $T5$ управляют одновибраторы $T21$ — $T25$ (см. эпюры 4, 5; рис. 55). С выхода первого временного селектора $T5$ импульсы A_2 и B_2 (рис. 57) через диоды $D1$, $D2$ проходят на согласующие эмиттерные повторители $T6$ и $T9$, с выходов которых они поступают на временные селекторы $T7$ и $T8$ соответственно. $T7$ и $T8$ управляются триггерами на туннельных диодах $D3$ и $D7$ таким образом [31] (эпюры 9, 11, рис. 55), что с их коллекторов снимаются по отдельности импульсы A_2 и B_2 соответственно (эпюры 10, 12). Импульсы A_2 через резисторы $R1$, $R2$ и B_2 через резисторы $R3$, $R4$ поступают на триггер-дискриминатор $D4$. В статическом состоянии туннельный диод $D4$ находится в режиме малого напряжения. Импульсом A_2 он переключается в режим высокого напряжения, а импульсом B_2 — в исходное состояние (это оказывается возможным потому, что импульсы A_n и B_n всегда разнополярны [31]). Та-

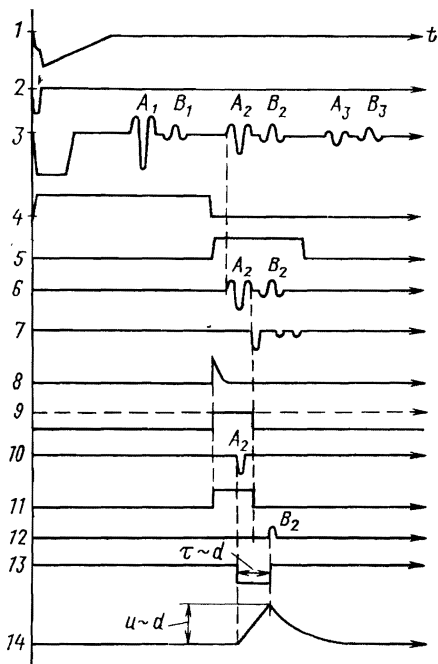


Рис. 55. Временная диаграмма, поясняющая работу толщиномера. Импульсы напряжения:

1 — на ПП; 2 — акустический зондирующий импульс; 3 — на выходе усилителя (эмиттер $T4$); 4 — на коллекторе $T22$; 5 — на коллекторе $T25$; 6 — на выходе временного селектора ($T5$); 7 — на выходе $L3$; 8 — импульс сброса (на $D9$); 9 — на базе $T7$; 10 — на коллекторе $T7$; 11 — на базе $T8$; 12 — на коллекторе $T8$; 13 — на $D4$; 14 — на выходе время-амплитудного преобразователя ($T13$)

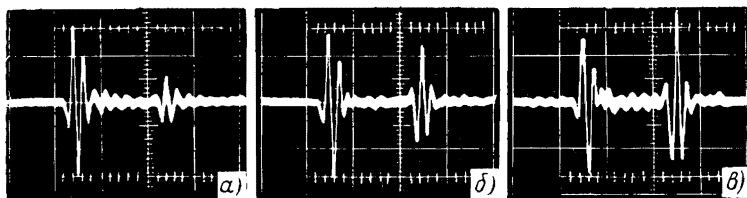


Рис. 56. Осциллограммы, иллюстрирующие эффект псевдоусиления УЗ эхо-импульсов при взаимодействии с контролируемым изделием

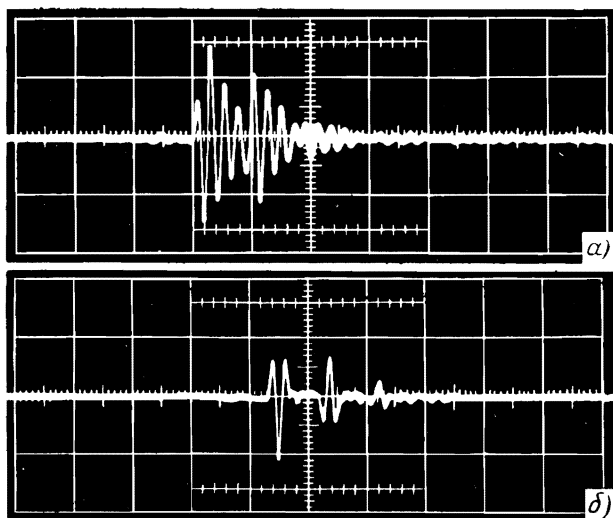


Рис. 57. Осциллограммы импульсов на выходе первого временного селектора $T5$:

а — без компенсации свободных колебаний пьезоэлемента;
 б — с компенсацией (кнопка $Kн1$ замкнута)

ким образом, на $D4$ формируется прямоугольный импульс отрицательной полярности длительностью τ (эюра 13). В исходное состояние триггеры $D3$, $D7$ переводятся импульсом сброса (эюра 8), снимаемые с коллектора $T23$. Этим же импульсом «подтверждается» в статическом состоянии и триггер $D4$. Пороги срабатывания триггера $D4$ от импульсов A_2 и B_2 определяются соответственно произведениями $(R_1+R_2) (i_1-i_p)$ и $(R_3+R_4) (i_p-i_2)$, где i_1 — ток максимума туннельного диода; i_2 — ток минимума; i_p — ток в исходной рабочей точке $D4$, который задается резисто-

ром $R5$. Вопрос о выборе рабочей точки $D4$ имеет особое значение для работы толщиномера в целом и будет рассмотрен ниже.

Пороги срабатывания $D4$ должны быть пропорциональны амплитудам импульсов A_2 , B_2 (см. ниже). По абсолютной величине пороги выбирают равными примерно половинам амплитуд A_2 и B_2 , а их отношение легко определяется из выражения (35). При этом снижаются требования к стабильности коэффициента усиления основного усилителя ($T1$ и $T4$), амплитуд зондирующих импульсов, формируемых компенсированным генератором и т. п.

Прямоугольные импульсы, снимаемые с $D4$, усиливаются каскадом на $T10$, с выхода которого они поступают на управляющий вход время-амплитудного преобразователя $T11$ — $T13$. Пределы измерения толщины скачкообразно изменяются переключением $П1$ конденсаторов $C1$ и $C2$ (их может быть и больше). Импульсы положительной полярности, амплитуды которых пропорциональны τ , снимаются с эмиттера $T13$ и при помощи переключателя $П2$ подаются на входы регистрирующих устройств (импульсного вольтметра или дифференциального дискриминатора) (см. эпюру 14).

Импульсный вольтметр состоит из затягивающей цепочки с закрытым входом $C3$, $D11$, $R6$ и балансного усилителя постоянного тока на полевых транзисторах $T14$, $T15$. Особое внимание было уделено выбору их режима. Известно [42], что при определенном токе стока $i_{ст}$ температурный дрейф последнего оказывается нулевым. Для примененных транзисторов КП102 условие нулевого дрейфа записывается в виде $S/i_{ст} = 3,21 \text{ В}^{-1}$, где S — крутизна стокзатворной характеристики. На практике дрейф нуля балансного усилителя не более $0,15 \text{ мВ}$ на 1° . Чувствительность балансного каскада регулируется потенциометром $R7$; установка нуля выполняется потенциометром $R9$. Шкала импульсного вольтметра градуируется в единицах толщины, и прибор может быть использован для измерения толщины изделий с непосредственным отсчетом. С потенциометра $R8$ можно снимать аналоговый сигнал, пропорциональный d .

При использовании толщиномера для разбраковки изделий по толщине к выходу время-амплитудного преобразователя подключается дифференциальный дискриминатор. Ширина «окна» дискриминатора выбирается в зависимости от допуска на толщину, а средний уровень «окна» — равным амплитудам импульсов, соответствующих номинальной толщине. Ширина «окна» регулируется потенциометром $R10$, а уровень — двоянным потенциометром $R11$.

Два интегральных дискриминатора, составляющих дифференциальный, представляют собой триггеры на туннельных диодах $D17$, $D18$. Триггеры срабатывают от импульсов, снимаемых с выхода время-амплитудного преобразователя (если их амплитуды превышают соответствующие пороги срабатывания), а в исходное состояние переключаются импульсами сброса, которые снимаются с коллектора $T24$ и соответствуют переднему фронту прямоугольного импульса, управляющего первым временным селектором $T5$. Если амплитуды импульсов, поступающих на триггер $D17$, превышают порог срабатывания, сигналы, снимаемые с него, усиливаются каскадом $T28$ (в статическом состоянии $T28$ заперт нулевым смещением), который шунтирует цепь управляющего электрода тиристора $D24$, предотвращая его включение. При толщинах, не выходящих из установленного допуска, дискриминатор $D17$ все время срабатывает, большую часть времени оставаясь в состоянии высокого напряжения. Короткие паузы между срабатыванием триггера и сбросом его

в исходное положение устраняются интегрирующей цепочкой $C4$, $R12$, и потенциал коллектора $T28$ остается практически постоянным. При этом тиристор $D24$ и электромагнитное реле $P2$ выключены. Если амплитуды импульсов на входе дискриминатора становятся ниже порога срабатывания $D17$, срабатывает $P2$ и зажигается лампочка $L3$ с надписью «Брак—». Дискриминатор $D18$ работает так же, только сигнализация ($L11$) негативна за счет введения фазоинвертера $T27$, т. е. если $D18$ начинает срабатывать в результате отклонения толщины в большую сторону, тиристор $D21$ включается, срабатывает реле $P1$ и зажигается лампочка $L1$ с надписью «Брак+». При уходе толщины в пределы допуска кнопкой $Kn1$ ($Kn2$) сигнализатор сбрасывается в исходное состояние; гаснет лампочка $L1$ ($L3$) и зажигается $L2$, сигнализирующая, что толщина в пределах допуска. Свободные контакты реле $P1$ и $P2$ можно использовать для автоматического выключения установки контроля толщины.

Толщиномер снабжен осциллографическим индикатором, который предназначен для облегчения настройки датчика относительно контролируемого изделия и настройки компенсированного генератора на режим наиболее полной компенсации свободных колебаний $ПП$.

Генератор развертки $T34$, $T35$ выполнен по схеме, аналогичной преобразователю время—амплитуда. Прямоугольные импульсы, управляющие генератором развертки, снимаются с одновибратора $T32$, $T33$. Длительность развертки равна 3 и 6 мкс. Изменение длительности развертки осуществляется переключателем $ПЗ$. В схеме предусмотрена регулируемая задержка развертки (одновибратор $T29$, $T30$) относительно зондирующего импульса. Это позволяет рассматривать на экране электронно-лучевой трубки все эхо-импульсы A_n , B_n .

Усилители вертикального отклонения и X -развертки ($T39—T41$ и $T36—T38$ соответственно) схемно выполнены одинаково: двухтактный каскад с фазоинвертером на входе. Они отличаются только полосой пропускания, которая у усилителя вертикального отклонения равна 14 МГц ($f_H=3$; $f_B=17$ МГц), а у усилителя X -развертки 3 МГц ($f_H=0,5$; $f_B=3,5$ МГц).

Основные питающие напряжения в приборе (-22 и $+33$ В) стабилизированы. Усилители вертикального и горизонтального отклонения и электронно-лучевая трубка питаются нестабилизированными напряжениями $+175$ и -975 В. Мощность, потребляемая прибором от сети переменного тока, около 35 Вт.

Общая погрешность измерений для иммерсионных толщиномеров, как известно, складывается в основном из методической и инструментальной погрешностей. Методическая погрешность, в частности, для эхо-импульсного метода толщинометрии возникает вследствие отличия реальной геометрии акустического тракта от идеальной (главным образом из-за отклонений угла ввода ультразвука в изделие), а также вследствие конечной длительности фронтов эхо-импульсов. Погрешность измерений, обусловленная конечной длительностью фронтов, в принятой схеме измерения временных интервалов полностью исключается, если $A_n/B_n = \text{const}$ [31].

Поясним это с помощью рис. 58, *a*, на котором условно изображены импульсы A_n и B_n (для упрощения они изображены однополярными). Допустим, что амплитуды импульсов A_n и B_n не равны (например, $A > B$). Если установлен порог I срабатывания дис-

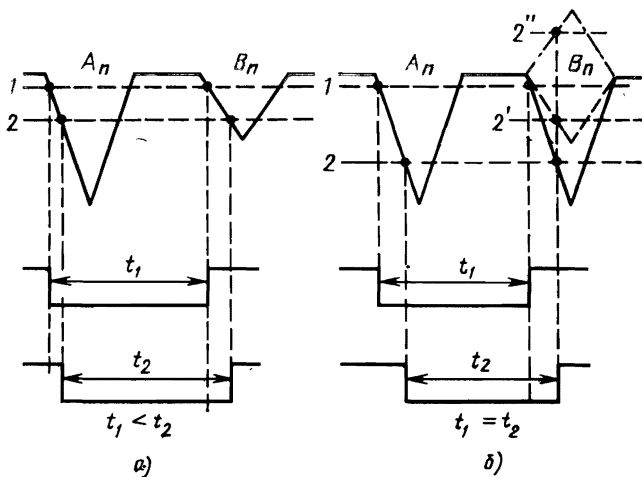


Рис. 58. К выбору порогов срабатывания триггера-дискриминатора

криминатора (порог опрокидывания $D4$ см. рис. 54), то длительность импульса на выходе равна t_1 . Если изменить порог срабатывания (порог 2), изменится и длительность t_2 импульса на выходе дискриминатора ($t_1 < t_2$). На рис. 58, б видно, что если каким-либо образом уравнивать импульсы A_n и B_n по амплитуде, длительность импульса на выходе триггера-дискриминатора постоянна. Длительность импульса не будет зависеть ни от величины порога срабатывания, ни от общего уровня сигналов A_n и B_n . Если амплитуды импульсов A_n и B_n все же различны, а это и имеет место в действительности, то эти импульсы необходимо разделить при помощи схемы временной селекции по разным каналам и для каждого из них установить разные по абсолютной величине, но одинаковые относительно соответствующих амплитуд пороги срабатывания триггера-дискриминатора. На рис. 58, б амплитуда импульса, изображенного жирной штриховой линией, вдвое меньше амплитуды импульса A_n , но при этом и порог срабатывания 2' вдвое ниже порога 2. Равенство $t_2 = t_1$ сохраняется. Как видно из рис. 58, б, сказанное остается в силе и в нашем случае, когда полярности импульсов A_n и B_n противоположны.

Таким образом, с точки зрения погрешности прибора в целом в работе триггера-дискриминатора имеет значение стабильность отношения порогов срабатывания от импульсов A_2, B_2 . Эту погрешность можно обратить в ноль, если выбрать рабочую точку i_p туннельного диода $D4$ (см. рис. 54) согласно условию

$$i_p = \frac{(|\gamma_2| + |\gamma_1|) i_2 i_1}{|\gamma_1 i_1| + |\gamma_2 i_2|},$$

где i_1, i_2 — токи соответственно максимума и минимума туннельного диода $D4$; γ_1, γ_2 — температурные коэффициенты токов максимума и минимума.

Так, для туннельного диода АИ301А с $\gamma_1 = -0,03\%/^{\circ}\text{C}$, $\gamma_2 = +0,25\%/^{\circ}\text{C}$, $i_1 = 2$ мА и $i_2 = 0,2$ мА рабочая точка, соответствующая нулевой неустойчивости, $i_p = 1,02$ мА. Следует добавить, что i_p стабилизируется прецизионным стабилизатором Д818Е с температурным коэффициентом $\text{ТКН} = 0,001\%/^{\circ}\text{C}$, поэтому неустойчивостью триггера-дискриминатора (Д4) можно пренебречь.

Инструментальная погрешность прибора складывается в основном из нелинейности преобразователя время—амплитуда, неустойчивости балансного каскада и неустойчивости дифференциального дискриминатора. Нелинейность преобразования временных интервалов в амплитуду определяется выражением

$$\varepsilon = \left| \frac{U}{E} \right| \left| \frac{R_{13}}{\beta R_{14}} \right| 100\%,$$

где $E = +11$ В — напряжение питания преобразователя; U — амплитуда импульсов на его выходе; β — коэффициент передачи тока базы Т12.

Для транзисторов ГТ313В типичное значение $\beta = 150$. При $K = U/E = 0,9 - 0,5$ нелинейность $\varepsilon = 0,3 - 0,17\%$. Температурной зависимостью ε из-за изменений β можно пренебречь, так как она имеет величину большего порядка малости, чем ε . Как отмечалось выше, дрейф нуля балансного каскада не более $0,15$ мВ/ $^{\circ}\text{C}$, поэтому, если сопротивление $R_7 = 100$ кОм, дрейф тока через индикатор I (см. рис. 54) составляет приблизительно 22 нА, что при использовании индикатора чувствительностью 100 мкА даст погрешность измерений $\delta_1 \approx 0,02\%$. Погрешность, обусловленная температурной неустойчивостью дифференциального дискриминатора δ_2 , определим из выражения

$$\delta_2 = \left| \frac{\gamma_1 L_1}{i_1 - i_p} - \text{ТКН} \right| \Delta T,$$

где ΔT — изменение температуры окружающей среды; i_1 — ток максимума; γ_1 — температурный коэффициент i_1 ; i_p — ток в рабочих точках Д17 и Д18 (см. рис. 54); $\text{ТКН} = -0,02\%/^{\circ}\text{C}$ — температурный коэффициент стабилизатора Д19 (Д818Б).

В дифференциальном дискриминаторе так же, как и в триггер-дискриминаторе Д4, применены туннельные диоды АИ301А. Подставив значения их параметров, приведенные выше, и выбрав одинаковые $i_p = 0,5$ мА, при $\Delta T = \pm 15^{\circ}\text{C}$ получим $\delta_2 = \pm 0,3\%$ (если в качестве Д19 вместо ДВ18Б применить стабилизаторы типа КС139А с $\text{ТКН} = -0,1\%/^{\circ}\text{C}$, δ_2 можно свести к нулю). Отсюда видно, в частности, что близлежащие границы разбраковки можно устанавливать $\pm 3\%$ номинальной толщины контролируемых изделий.

Итак, погрешность контроля толщины при помощи описанного толщиномера с использованием дифференциального дискриминатора $\varepsilon + \delta_2 \approx 0,6$ (здесь ε , принятое равным $0,3$ для режима работы время—амплитудного преобразователя, когда $K = 0,9$, является оптимальным). При использовании импульсного вольтметра погрешность измерений $\varepsilon + \delta_1 = 0,3\%$. Относительная погрешность измерений с уменьшением толщины уменьшается за счет уменьшения ε . Минимальная толщина изделий из стали и алюминиевых сплавов, поддающаяся измерению данным толщиномером, около $0,3$ мм (при контроле изделий из стали временным селектором Т5 предпочтительно выделять импульсы A_3 и B_3).

Скорость контроля толщины изделий определяется выражением

$$V = \frac{D}{m} F,$$

где $F=10^4$ Гц — частота следования импульсов задающего блокинг-генератора Т14 (см. рис. 54); m — число измерений за время смещения контролируемого изделия на расстояние, равное одному диаметру рабочей части пьезоэлемента $D=$ мм. Так, если $m=1\div 2$, $V=40\div 20$ м/с.

Описанный толщиномер с успехом может быть использован для регистрации отслоений в биметаллических изделиях. При этом минимальная площадь выявляемых дефектов, если расстояние между поверхностью контролируемого изделия и датчиком не превышает 12 мм, составляет 6—7 мм².

В заключение отметим, что этот толщиномер в цеховых условиях эксплуатируется исключительно для контроля особо тонкостенных труб диаметром от 5 до 60 мм и обеспечивает в автоматическом режиме реальную погрешность не выше 1%. Работа прибора на изделиях с параметром шероховатости поверхностей ниже $Rz=20$ и непараллельностью более 2% не исследовалась.

3. ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭХО-ИМПУЛЬСНЫХ ТОЛЩИНОМЕРОВ

В предыдущих главах было показано, что с помощью современных УЗ эхо-импульсных толщиномеров в настоящее время можно решать большое число практических задач ручного и автоматического контроля изделий и полуфабрикатов, причем наиболее эффективно применение этих приборов в тех случаях, где возможен только односторонний доступ к контролируемому (измеряемому) объекту. Современное состояние теории пьезоэлектрических преобразователей УЗ колебаний, достижения микроэлектроники и схемотехники усиления малых импульсов тока и прецизионного измерения временных интервалов в диапазоне от долей наносекунд до единиц миллисекунд и более позволяет надеяться, что в ближайшие годы появится новый серийный эхо-импульсный толщиномер с более высокими техническими характеристиками, чем у известных приборов.

Однако никакие количественные улучшения характеристик эхо-импульсных и любых других УЗ толщиномеров не избавят их от единственного принципиального недостатка — непосредственной зависимости показаний прибора от скорости ультразвука в материале изделия. Это приводит к необходимости изготовления, аттестации и накопления на предприятиях, широко применяющих ультразвуковые толщиномеры, большого числа образцов толщины (эталонов) из различных материалов и даже из одного материала разной термической и механической обработки. На практике для проверки толщиномеров используют наборы плоскопараллельных концевых мер длины по ГОСТ 9038—73 (плитки Иогансона) и щупы № 2—4 по ГОСТ 882—75 при толщинах менее 1 мм. Госстандартом разработан комплект мер КМТ176-010 [43] для проверки ультразвуковых толщиномеров в диапазоне толщин 0,2—50 мм и определения их работоспособности на гладких и шероховатых плоскопараллельных поверхностях из стали, алюминия и латуни, а также на поверхностях

с различными радиусами кривизны. Проверку работоспособности толщиномеров на клиновидных стенках осуществляют с помощью набора непараллельных мер толщины с углами от 1 до 15°. С помощью известных ультразвуковых, в частности эхо-импульсных, толщиномеров невозможно измерение толщины изделий из материалов с неизвестной скоростью звука при одностороннем доступе к ним, если отсутствуют образцы толщины из этих же материалов.

В настоящее время уже имеется ряд публикаций [А. с. 372432 (СССР)], посвященных исследованию принципиальной возможности и попыткам практического создания так называемых безэталоновых эхо-импульсных толщиномеров. Эти исследования следует считать важнейшим направлением совершенствования эхо-импульсных УЗ толщиномеров. Остановимся на этом несколько подробнее.

В работе [3] предложен способ измерения толщины путем возбуждения в изделии сразу трех типов волн: продольных, сдвиговых и поверхностных на заданном базовом расстоянии d_1 . По времени прохождения импульсов этих колебаний T_l , T_t и T_R соответственно можно определить толщину изделия

$$d_2 = \frac{d_1}{2} \frac{T_t}{T_R} \frac{3T_t^2 - 4T_l^2}{2,86T_t^2 - 3,98T_l^2}.$$

Этот способ не зависит от физико-механических свойств материалов измеряемых изделий. Его недостаток состоит в сложности практической реализации, связанной с необходимостью возбуждения в изделии одновременно трех типов волн.

В той же работе [2] предложен другой, более простой способ измерения толщины, являющийся частным случаем первого и предполагающий использование только двух типов волн — поверхностных и сдвиговых.

В обоих случаях основой является измерение непосредственно на изделии текущего значения скорости распространения поверхностных УЗ колебаний ($C_R = d_1/T_R$) и пересчет ее в скорость сдвиговых колебаний через коэффициент Пуассона σ :

$$C_t = \frac{1 + \sigma}{0,87 + 1,12\sigma} C_R. \quad (36)$$

Искомая толщина $d_2 = C_t T_t / 2$. Первым способом измеряется и текущее значение σ по времени прохождения измеряемой толщины изделия сдвиговыми и продольными УЗ колебаниями:

$$\sigma = [2 - (T_t/T_l)^2] / [2 - 2(T_t/T_l)^2].$$

Нами предложен практический вариант схемы безэталонного УЗ толщиномера, работа которого основана на втором из двух описанных выше способов измерения толщины. Работает прибор следующим образом. Генератор 1 (рис. 59) короткими электрическими импульсами (эпюра 1, рис. 60) возбуждает пьезоэлемент 2, излучающий через тонкий слой контактной среды импульсы сдвиговых ультразвуковых колебаний в измеряемое изделие 3 толщиной d_2 . Эти импульсы распространяются по изделию, как это показано вертикальными стрелками на рис. 59, отражаются от нижней поверхно-

сти и возвращаются на пьезоэлемент 2 через время (эпюра 2, рис. 60).

$$t_2 = \frac{2d_2}{c_t} . \quad (37)$$

Одновременно с возбуждением сдвиговых колебаний, пьезоэлемент 2 возбуждает и поверхностные волны Рэлея [3], которые, распространяясь, как это показано горизонтальной стрелкой, по поверхно-

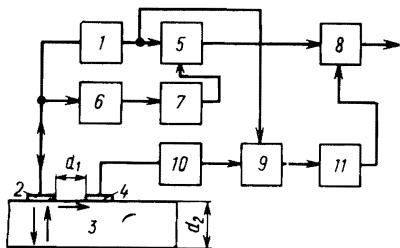


Рис. 59. Блок-схема безэталонного толщиномера

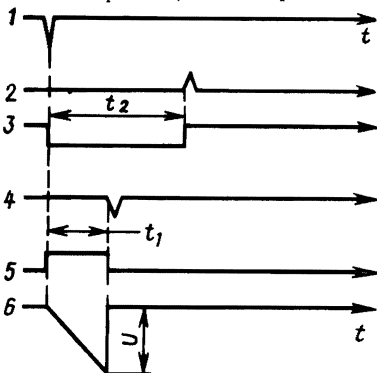


Рис. 60. Временная диаграмма, поясняющая работу безэталонного толщиномера

сти изделия, принимаются вторым пьезоэлементом 4 (эпюра 4), расположенным на фиксированном расстоянии d_1 от пьезоэлемента 2, через время

$$t_1 = \frac{d_1}{c_R} . \quad (38)$$

Генератор 1 одновременно с возбуждением пьезоэлемента 2 запускает триггер 5 (эпюра 3). Импульсы (эпюра 2), отраженные от нижней поверхности изделия, пройдя амплитудный ограничитель 6 высоковольтных импульсов генератора 1, усиливаются усилителем 7. С выхода усилителя 7 они поступают на другой вход триггера 5 и возвращают его в исходное состояние. Таким образом, на выходе триггера 5 формируется прямоугольный импульс (эпюра 3), длительность которого для данной скорости c_t пропорциональна толщине d_2 контролируемого изделия.

Этот импульс поступает на вход преобразователя 8 масштаба времени, длительность импульсов на выходе которого прямо пропорциональна длительности входных импульсов, а значит, и толщине измеряемого изделия. Измеряя длительность этих импульсов любым из известных радиотехнических способов при шкале, градуированной в единицах длины, можно непосредственно получать значения толщины измеряемого изделия.

Однако из выражения (37) видно, что при изменении скорости c_t показания прибора должны изменяться. Зависимость показаний

прибора от изменений скорости c_t с высокой точностью исключается в предлагаемом приборе следующим образом. Из выражения (36) видно, что отношение скоростей поверхностных и сдвиговых ультразвуковых колебаний

$$\frac{c_R}{c_t} = \frac{0,87 + 1,12\sigma}{1 + \sigma} = K. \quad (39)$$

В реальных средах $0 \leq \sigma \leq 0,5$, а практически для всех нежидких металлов $0,28 \leq \sigma \leq 0,42$ (см. приложение). Легко рассчитать,

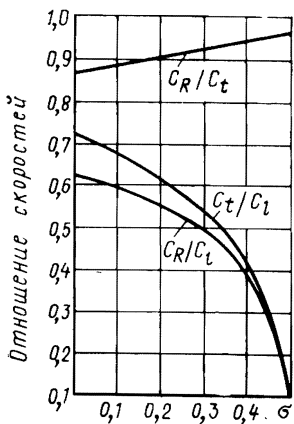


Рис. 61. Зависимость отношения скоростей распространения ультразвука от коэффициента Пуассона

c_t , c_l , c_R — скорости сдвиговых, продольных и поверхностных волн соответственно

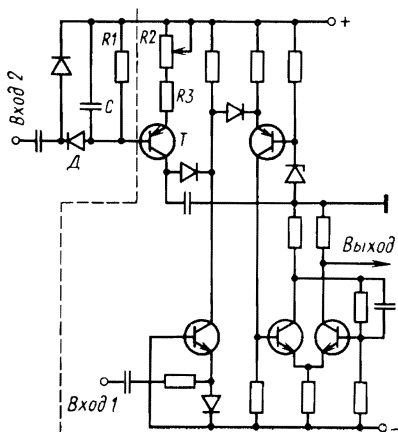


Рис. 62. Принципиальная схема управляемого преобразователя временного масштаба

что при значениях $\sigma = 0,28 \div 0,42$ отношение $K \approx 0,934 \pm 1\%$ (рис. 61). Если теперь из выражения (39) выразить c_t через c_R :

$$c_t = \frac{c_R}{K}, \quad (40)$$

из (38) получить

$$c_R = \frac{d_1}{t_1} \quad (41)$$

и подставить выражение (41) в (40), а результат затем подставить в выражение (37), можно получить новое выражение для толщины измеряемого изделия

$$d_2 = \frac{d_1 t_2}{2K t_1} = B \frac{t_2}{t_1}, \quad (42)$$

где $B=d_1/2K$. При фиксированном d_1 значение d_2 в выражении (42) при смене материала контролируемых изделий зависит только от величины K , т. е. изменяется (в частности, для подавляющего большинства металлов) всего на $\pm 1\%$.

Таким образом, из выражения (42) видно, что если сделать длительность импульса на выходе преобразователя масштаба времени δ (см. рис. 59) еще и обратно пропорциональной времени t_1 (времени t_2 она, как было показано, прямо пропорциональна), можно измерять толщину изделий, в частности, из металлов с любой скоростью распространения ультразвука без специальной калибровки прибора с принципиальной погрешностью не более $\pm 1\%$.

В рассматриваемом толщиномере это осуществляется следующим образом. Генератор 1 одновременно с запуском триггера 5 (см. рис. 59), запускает и триггер 9, который приводится в исходное состояние импульсом сдвиговых колебаний (см. рис. 60, эпюра 4), принятым пьезоэлементом 4 и усиленным усилителем 10. На выходе триггера 9 формируется прямоугольный импульс (эпюра 5) длительностью t_1 , равной времени распространения волны Рэлея от пьезоэлемента 2 к пьезоэлементу 4 и не зависящей от толщины измеряемого изделия. Этим импульсом запускается генератор пилообразного напряжения 11, на выходе которого формируется импульс (эпюра 6) с амплитудой U , прямо пропорциональной времени t_1 . Этот импульс поступает на второй (управляющий) вход преобразователя масштаба времени δ , который выполнен так, что его коэффициент преобразования, как было показано выше, прямо пропорционален времени t_2 , т. е. длительности импульса триггера 5, и обратно пропорционален времени t_1 , т. е. длительности импульса триггера 9. Исходя из выражения (42), именно эту функцию и должен выполнять предлагаемый толщиномер.

На рис. 62 показана принципиальная схема управляемого преобразователя временного масштаба — одного из основных узлов толщиномера. Часть схемы, справа от штриховой линии, представляет собой собственно преобразователь время—время. Эта часть схемы выполняет следующую функцию:

$$t_{и.вых} = \frac{i_{вх} t_{ивх}}{i_0}, \quad (43)$$

где $t_{и.вых}$ — длительность импульса на выходе схемы рис. 62; $t_{и.вх} = t_2$ — длительность импульса на ее Входе 1; $i_{вх}$ — ток, создаваемый этим импульсом в цепи Входа 1; i_0 — ток, создаваемый генератором постоянного тока на транзисторе Т.

Из выражения (43) видно, что $t_{и.вых}$ прямо пропорционально времени t_2 .

На Вход 2 схемы поступают пилообразные импульсы генератора 11 (см. рис. 59), «затягиваются» практически до постоянного напряжения $U_{пост} \approx U = At_1$ (где A — постоянный коэффициент) на цепочке $D, C, R1$ и, поступая на базу T , задают величину тока $i_0 \approx U/(R_2 + R_3) = At_1/(R_2 + R_3)$. Подставив это значение i_0 в (43), получим

$$t_{и.вых} = \frac{i_{вх} t_2 (R_2 + R_3)}{At_1} = B' \frac{t_2}{t_1}, \quad (44)$$

где $B' = i_{вх}(R_2 + R_3)/A = B$. Совпадение выражений (42) и (44) говорит о том, что схема, представленная на рис. 62, а значит, и прибор в целом выполняют функцию (42).

Экспериментальный макет безэталонного толщиномера с цифровой индикацией при измерении образцов изделий из нескольких марок стали, алюминиевых сплавов, латуни, вольфрама и органического стекла в диапазоне толщин 2—50 мм имеет погрешность не более 1,3—1,7% измеряемой величины. Никакой перестройки прибора при переходе с одного материала на другой не требуется. При настройке прибора на среднее значение K для какой-либо узкой группы материалов (например, углеродистых сталей, хромистых и нержавеющей сталей, легких алюминиевых или титановых сплавов) принципиальную методическую погрешность прибора можно свести до десятых долей процента. При этом еще раз следует подчеркнуть, что прибор калибруется только однажды при настройке на среднее значение K для определенной группы материалов.

В качестве контактной смазки можно использовать в принципе любые жидкости, однако для ввода сдвиговых колебаний наиболее эффективны кремнийорганические жидкости, обладающие сдвиговой упругостью [44, 53]. Однако вследствие крайне большого затухания сдвиговых колебаний даже в жидкостях с заметной сдвиговой упругостью (до 40—60 дБ на глубине, равной 0,1 длины УЗ волны) на практике приходится использовать сравнительно низкочастотные УЗ колебания (0,1—1 МГц и ниже), что не позволяет измерять малые (порядка миллиметра и ниже) толщины. В рассмотренном выше толщиномере при частоте УЗ колебаний 500 кГц удавалось измерять при контроле через жидкую среду толщины не ниже 10—15 мм. Для измерения меньших толщин использовалась частота 5 МГц, а пьезоэлемент приклеивался непрочным специальным клеем с температурой плавления +40 до +42°C или салолом.

При современном техническом уровне ультразвуковых преобразователей наиболее рациональным для реализации безэталонного способа измерения толщины является использование комбинации электромагнитно-акустических (ЭМА) [49, 59] преобразователей для сдвиговых УЗ колебаний, направленных по нормали к поверхности контролируемого изделия, и обычных пьезопреобразователей (или ЭМА) для поверхностных волн.

В настоящее время ведутся широкие исследования возможности применения в приборах неразрушающего контроля так называемых головных или подповерхностных продольных УЗ волн¹. Их применение весьма перспективно для создания безэталонных толщиномеров. Головные волны возбуждаются в контролируемом объекте при наклонном падении на его поверхность продольных волн, генерируемых обычными наклонными совмещенными пьезопреобразователями. Максимум амплитуды акустического давления в этих волнах расположен под поверхностью изделия, и скорость распространения равна скорости обычных объемных продольных УЗ волн, т. е. головные волны не имеют ничего общего с поверхностными волнами Рэлея.

¹ Ермолов И. Н., Разыграев И. П., Щербинский В. Г. Исследование акустических волн головного типа для ультразвукового контроля. — Дефектоскопия, 1978, № 1, с. 33—40; Ермолов И. Н., Разыграев И. П., Щербинский В. Г. Исследование процесса формирования акустического поля головной волны в контролируемой среде. — Дефектоскопия, 1978, № 11, с. 5—10.

Существуют оптимальные углы падения продольной волны на поверхность, изделия, при которых амплитуда возбуждаемой головной волны максимальна. Однако даже при нормальном падении пучка продольных волн на поверхность любого изделия во все стороны от точки падения под поверхностью изделия также возникают головные волны; их амплитуда может быть на один-два порядка меньше, чем при оптимальном возбуждении, но эксперименты показали, что и в этом случае они четко регистрируются с помощью усилителя, имеющего коэффициент усиления не более 10^3 .

Таким образом, на базе обычного эхо-импульсного толщиномера, в котором используется нормальный совмещенный пьезопреобразователь, излучающий и принимающий продольные УЗ волны, можно создать безэталонный толщиномер. Для этого необходимо рядом с основным преобразователем расположить на фиксированном расстоянии от него приемник головных волн и информацию с его выхода ввести в управляемый преобразователь временного масштаба, например, такой, как показан на рис. 62.

Преимущество использования в безэталонном толщиномере обычных и головных продольных волн состоит в повышении чувствительности прибора, возможности применять любые самые обычные контактные смазки, а также в реализации иммерсионного варианта контроля. Последнее невозможно при использовании сдвиговых УЗ колебаний, так как они не распространяются в жидкой среде.

В заключение отметим, что в самое последнее время разработан новый класс высокоэффективных широкополосных ультразвуковых преобразователей, названных поверхностно возбуждаемыми толстыми пьезопреобразователями (ПВТП)*.

Преимущества ПВТП перед широкополосным преобразователем, описанным в гл. II, состоят в следующем: более высокий (на 1—2 порядка) коэффициент двойного электромеханического преобразователя, возможность концентрации и фокусировки УЗ в узкие плоские и аксиально симметричные пучки без применения специальных УЗ линз и, как следствие, более высокая чувствительность, чрезвычайная простота конструкций и технологии изготовления.

Принцип работы одной из разновидностей ПВТП рассмотрен в гл. II (см. рис. 37).

С 1978 г. прибор УТ-31МЦ, описанный выше, комплектуется ПВТП, который представляет собой стандартный цилиндр, равномерно поляризованный по всему объему, выполненный из пьезокерамики ЦТС-19 диаметром 8,5 мм и высотой 10 мм. На одном основании его расположены два полукруглых электрода, разделенных узким (0,2 мм) промежутком. УЗ колебания генерируются, как и в преобразователе (см. рис. 37), у основания, несущего электроды; тело цилиндра служит УЗ линией задержки, а другое его основание, не имеющее электродов, служит выходом УЗ линии и является контактной площадкой преобразователя в целом.

* **Королев М. В.** Экспериментальное исследование поверхностно возбуждаемых пьезопреобразователей. — Дефектоскопия, 1978, № 11, с. 38—47; **Королев М. В., Карпельсон А. Е.** Сравнительная оценка коэффициентов преобразования пьезоискателей. — Дефектоскопия, 1979, № 6, с. 44—49. **Королев М. В., Карпельсон А. Е., Шевалдыкин В. Г.** Акустические поля, формируемые поверхностно возбуждаемыми толстыми пьезопреобразователями. — Дефектоскопия, 1979, № 11, с. 50—64.

Использование этого ПВТП позволило в 10 раз повысить чувствительность прибора УТ-31МЦ и, как следствие, уменьшить минимальный радиус кривизны контролируемых изделий (в диапазоне 0,2—10 мм) до 10—15 мм (против 100—200 мм), снизить класс допустимой чистоты поверхности с $Rz=20\div 40$ до $Rz=80$. Такое значительное повышение чувствительности прибора благодаря применению ПВТП удалось достичь при одновременном снижении коэффициента усиления приемного усилителя в 10 раз.

Характеристики материалов

Материал	Удельная плотность ρ , г/см ³	Модуль Юнга E_Y Па · 10 ⁷	Модуль сдвига μ , кг/мм ²	Коэффициент поперечного сжатия σ	Скорость УЗ волн			Удельное акустическое сопротивление при 20°C $\rho c_{L\infty} \cdot 10^{-4}$, г/(см ² · с)
					продольных в неограниченной среде $c_{L\infty}$, м/с	поперечных c_t , м/с	поверхностных c_R , м/с	
Алюминий	2,7	7100	2640	0,34	6260	3080	2800	169
Бериллий	1,82	12 800	—	0,33	12 800	8710	7870	233
Баббит	11—15	—	—	—	6800—7300	4000—4700	—	770—1020
Бронза (фосфористая)	8,86	—	—	—	3530	2330	2010	312
Вольфрам	19,1	36 200	13 400	0,35	5460	2870	2650	1042
Висмут	9,8	3200	1200	0,33	2180	1100	1030	214
Железо	7,8	21 000	8200	0,28	5850	3230	3000	456
Золото	19,3	8120	2850	0,42	3240	1200	1140	626
Иридий	22,4	52500	—	—	5540	—	—	1241
Кадмий	8,6	5090	1960	0,3	2780	1500	1400	240
Константан	8,8	16 600	6250	0,33	5240	2640	—	460
Кобальт	8,7	19 000	—	0,3	5350	3260	—	473
Латунь	8,1	10 050	3720	0,35	4430	2123	1950	361
Латунь ЛС-59-1	8,1	10 000	3700	0,32	4360	—	—	353
Медь	8,9	12 500	4640	0,35	4700	2260	1930	418
Магний	1,47	4100	—	0,33	5790	3100	2870	10,1
Молибден	10,09	—	—	0,3	6290	3350	3110	635
Манганин	8,4	12 600	4730	0,33	4660	2350	—	390
Никель	8,8	20 540	7850	0,31	5630	2960	2640	495
Ниобий	8,6	—	—	—	4100	1700	1580	353
Олово	7,3	5540	2080	0,33	3320	1670	1560	242
Платина	21,4	17 000	6100	0,39	3960	1670	1570	846
Ртуть	13,6	—	—	—	1450	—	—	190
Свинец	11,4	1600	580	0,44	2160	700	660	246
Серебро	10,5	7500	2720	0,38	3600	1590	1480	380

Материал	Удельная плотность ρ , г/см ³	Модуль Юнга ЕЮ Па · 10 ⁷	Модуль сдвига μ , кг/мм ²	Коэффициент поперечного сжатия σ	Скорость УЗ волн			Удельное акустическое сопротивление при 20°C $\rho c_{L\infty} \cdot 10^{-4}$, г/(см ² · с)
					продольных в неограниченной среде $c_{L\infty}$, м/с	поперечных c_t , м/с	поверхностных c_R , м/с	
Сталь ХН77ТЮР	—	21 900	8400	0,3	6080	—	—	—
Сталь 40ХНМА	8,2	19 400	—	0,29	5600	330	—	459
Сталь ХН70ВМТЮ	—	20 500	7800	0,32	5960	—	—	—
Сталь ХН35ВТ	—	20 000	7800	0,29	5680	—	—	—
Сталь Ст3	—	21 900	8500	0,28	5930	—	—	—
Титан	4,5	—	—	0,32	6000	3500	2790	270
Уран	18,7	—	—	—	3300	—	—	620
Цинк	7,1	10 500	4200	0,25	4170	2410	222	296
Цирконий	6,5	—	—	—	4900	2900	2660	320
Капрон	1,1	—	—	—	2640	—	—	29
Кварц плавленый	2,2	—	—	—	5930	3750	3390	130
Лед	1	988	372	0,33	3980	1990	1860	39,8
Плексиглаз	1,18	535	151	0,35	2670	1120	1050	31,5
Полистирол	1,06	426	136	0,32	2350	1120	1040	24,9
Фарфор	2,41	5860	2381	0,23	5340	3120	2860	129
Эбонит	1,2	—	—	—	2400	—	—	29
Эпоксидная смола ЭД-5	1,1	—	—	—	2580	—	—	28,3
Ацетон	0,792	—	—	—	1192	—	—	9,4
Бензол	0,878	—	—	—	1326	—	—	11,6
Вода	0,998	—	—	—	1490	—	—	14,9
Глицерин	1,265	—	—	—	1923	—	—	24,2
Керосин	0,825	—	—	—	1295	—	—	10,7
Спирт метиловый	0,792	—	—	—	1123	—	—	8,9
Спирт этиловый	0,789	—	—	—	1180	—	—	9,3
Трансформаторное масло	0,91	—	—	—	1400	—	—	12,8

1. Барышев С. Е. О влиянии электрической и акустической нагрузки на основные характеристики пьезоэлектрического преобразователя в режиме приема. — Дефектоскопия, 1971, № 4, с. 52—69.
2. Бронников В. К., Тарасов Ю. И. Использование ультразвукового толщиномера «Кварц-6». — Дефектоскопия, 1973, № 3, с. 132—133.
3. Бутенко А. И., Шкарлет Ю. М. О некоторых возможностях ультразвуковой безэталоной толщинометрии. — В кн.: Неразрушающий контроль материалов, изделий и сварных соединений, Сб. докладов VII Всесоюзной конференции, Киев, 13—15 мая 1974, М., изд. НИИИН. 1974, с. 198—202.
4. Викторов И. А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М., Наука, 1966. 168 с.
5. Гитис М. Б., Сажин В. В. К расчету добротности пьезоэлектрических датчиков. — Дефектоскопия, 1969, № 5, с. 45—51.
6. Глозман И. А. Пьезокерамика. М., Энергия, 1972, 288 с.
7. Гребенник В. С. Ультразвуковые методы измерения толщины. — Дефектоскопия, 1967, № 5, с. 1—12.
8. Домаркас В. И., Кажис Р.-И. Ю. Влияние электрических цепей на частотные характеристики пьезоизлучателей с переходным слоем. — Дефектоскопия, 1971, № 3, с. 80—87.
9. Домаркас В. И., Кажис Р.-И. Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс, Минтис, 1975, 255 с.
10. Домаркас В. И., Кажис Р.-И. Ю. Оптимизация параметров пьезопреобразователей, работающих в импульсном режиме. — Дефектоскопия, 1972, № 3, с. 45—52.
11. Дьяконов В. П. Лавинные транзисторы и их применение в импульсных устройствах. М., Советское радио, 1973, 207 с.
12. Ермолов И. Н. Методы ультразвуковой дефектоскопии (курс лекций) ч. 1, М., МГИ, 1967. 267 с.
13. Ермолов И. Н., Рыжов-Никонов В. И. Теория работы пьезоэлектрических искателей ультразвуковых дефектоскопов. Ч. II. Результаты исследований электроакустического тракта эхо-дефектоскопа. — Дефектоскопия, 1976, № 6, с. 64—75.
14. Зайцев С. Г. Измерение ударных волн. — Приборы и техника эксперимента, 1958, № 6, с. 97—99.
15. Залесский В. В. Анализ и синтез пьезоэлектрических преобразователей. Ростов, РГУ, 1971. 190 с.

16. Кажис Р.-И. Ю., Домаркас В. Н. Исследование частотных характеристик механически недемпфированных пьезопреобразователей, нагруженных электрическими цепями. — Дефектоскопия, 1970, № 2, с. 73—80.
17. Кажис Р.-И. Ю., Лукошевичус А. И., Саяускас С. И. Генератор коротких однополярных ультразвуковых импульсов. — Дефектоскопия, 1973, № 5, с. 135—137.
18. Кескюла А. Ю. Способы увеличения широполосности акустического тракта дефектоскопических устройств. — Дефектоскопия, 1975, № 3, с. 50—61.
19. Королев М. В. Аperiodический пьезодатчик для ультразвуковых дефектоскопов. — Дефектоскопия, 1973, № 4, с. 12—18.
20. Королев М. В. Генератор для ультразвуковых линий задержки. — Приборы и техника эксперимента, 1970, № 4, с. 148—149.
21. Королев М. В. Генератор коротких импульсов для ультразвуковых дефектоскопов. — Дефектоскопия, 1970, № 1, с. 127—129.
22. Королев М. В. Генератор наносекундных импульсов для возбуждения аperiodических пьезодатчиков. — Приборы и техника эксперимента, 1973, № 4, с. 125—126.
23. Королев М. В. Генератор радиоимпульсов на транзисторах. — Приборы и техника эксперимента, 1969, № 6, с. 89—90.
24. Королев М. В. Некоторые способы формирования коротких акустических импульсов. — Дефектоскопия, 1973, № 2, с. 72—77.
25. Королев М. В. Новые ультразвуковые аperiodические пьезопреобразователи. — Дефектоскопия, 1976, № 3, с. 86—89.
26. Королев М. В. Приемное и передающее устройства для широкополосных ультразвуковых линий задержки. — Приборы и техника эксперимента, 1973, № 3, с. 100—102.
27. Королев М. В. Приемно-передающий тракт эхо-импульсных ультразвуковых дефектоскопов со сверхвысокой разрешающей способностью. — Дефектоскопия, 1974, № 1, с. 89—96.
28. Королев М. В. Универсальный эхо-импульсный ультразвуковой толщиномер. — Дефектоскопия, 1972, № 1, с. 38—45.
29. Королев М. В. Широкодиапазонный эхо-импульсный ультразвуковой толщиномер с цифровой индикацией. — Дефектоскопия, 1974, № 5, с. 38—45.
30. Королев М. В. Экспериментальное определение закона изменения уровня поляризации в пьезокерамических элементах. — В кн.: Современные методы и средства неразрушающего контроля качества изделий, сб. трудов НИКИМП, вып. 8, 1975, с. 22—24.
31. Королев М. В. Эхо-импульсный ультразвуковой толщиномер с повышенной разрешающей способностью и точностью. — Дефектоскопия, 1970, № 5, с. 38—44.
32. Королев М. В. Эхо-импульсный ультразвуковой толщиномер УТ-30К с цифровой индикацией. — Дефектоскопия, 1974, № 1, с. 143—144.
33. Королев М. В., Аристов В. В. Малогабаритный цифровой индикатор для ультразвуковых толщиномеров. — Дефектоскопия, 1975, № 1, с. 116—118.
34. Королев М. В., Аристов В. В. Ультразвуковой импульсный толщиномер УТ-30ИЦ. — Приборы и техника эксперимента, 1976, № 3, с. 278.
35. Королев М. В., Аристов В. В., Урываев В. В. Портативный эхо-импульсный ультразвуковой толщиномер УТ-31МЦ. — Дефектоскопия, 1977, № 2, с. 18—26.

36. **Королев М. В., Биренберг Э. И.** Расчет коэффициента преобразования совмещенного апериодического пьезодатчика. — Дефектоскопия, 1974, № 2, с. 7—12.
37. **Королев М. В., Карминский Ю. А.** Расчет амплитудно-частотной и переходной характеристик толстого апериодического пьезодатчика в режиме излучения. — Дефектоскопия, 1975, № 5, с. 87—92.
38. **Королев М. В., Пронякин В. Т., Дубинин Г. В.** Ультразвуковой дефектоскоп для контроля тонких сварных швов. — Дефектоскопия, 1969, № 3, с. 133—135.
39. **Ланге Ю. В.** О работе пьезоэлемента на низких частотах. — Дефектоскопия, 1970, № 4, с. 53—59.
40. **Ланге Ю. В., Королев М. В.** О применении усилителей напряжения и усилителей тока в ультразвуковой аппаратуре. — Дефектоскопия, 1974, № 6, с. 60—63.
41. **Магнитные и диэлектрические приборы.** Под ред. Г. В. Катца, М.-Л., Энергия, 1964. 416 с.
42. **Малин Б. В., Сонин М. С.** Параметры и свойства полевых транзисторов, М., Энергия, 1967. 112 с.
43. **Методика поверки ультразвуковых контактных толщиномеров в диапазоне толщины 0,2—50 мм МИ40—75.** М., Изд-во стандартов, 1975, 9 с.
44. **Мазон У.** Пьезоэлектрические кристаллы и их применение в ультразвуковом. М., Изд-во иностр. лит., 1952. 467 с.
45. **Неразрушающие испытания (справочник), Кн. II.** Под ред. Р. Мак-Мастера, М., Энергия, 1965. 492 с.
46. **Перлатов В. Г.** Теория импульсного режима работы пьезовибратора. — В кн.: Проблемы неразрушающего контроля, Кишинев, Наука, 1973, с. 42—49.
47. **Плужников В. М., Семенов В. С.** Пьезокерамические твердые схемы, М., Энергия, 1971. 168 с.
48. **Пономарев П. В.** Переходные процессы в пьезовибраторах. — Акустический журнал, 1957, том. III, вып. 3, с. 243—253.
49. **Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий (справочник)** Под ред. В. В. Ключева, т. 2. М., Машиностроение, 1976, 326 с.
50. **Сажин В. В., Селянина И. И.** К расчету раздельно-совмещенных датчиков для контроля цилиндрических и сферических поверхностей. — В кн.: Труды ВНИИНК, т. 1, Кишинев, Молдавская книга, 1969, с. 222—228.
51. **Сайткулов В. Г., Гребенник В. С.** Исследование погрешности импульсных толщиномеров с совмещенным преобразователем при контроле клиновидных профилей. — Дефектоскопия, 1975, № 5, с. 71—81.
52. **Смажевская Е. Г., Фельдман Н. Б.** Пьезоэлектрическая керамика. М., Советское радио, 1971. 199 с.
53. **Соколинский А. Г., Сухаревский Ю. М.** Магнетитовые ультразвуковые линии задержки. М., Советское радио, 1966. 231 с.
54. **Солоухин Р. И.** Измерение волн давления в ударных трубах. — Приборы и техника эксперимента, 1961, № 3, с. 170—171.
55. **Тищенко Н. М., Малышкин В. Г.** Динисторы и тиристоры и их применение в автоматике. М., Энергия, 1966. 168 с.
56. **Уша Е. Б., Ильин Б. А.** Вопросы проектирования низкочастотных усилителей для полупроводниковых детекторов. — В кн.:

- Ядерное приборостроение, вып. IX. М., Атомиздат, 1968, с. 50—59.
57. **Физическая акустика**. Т. I. (Методы и приборы ультразвуковых исследований). Под ред. У. Мезона. М., Мир, 1966. 592 с.
 58. **Цеслер Л. Б.** Малогабаритный ультразвуковой прибор «Кварц-5» для измерения толщины стенки деталей сложной формы. — В кн.: Проблемы неразрушающего контроля. Кишинев, Наука, 1973, с. 113—117.
 59. **Шкарлет Ю. М.** Бесконтактные методы ультразвукового контроля. М., Машиностроение, 1974. 57 с.
 60. **Шнырев П. Д.** Вопросы технологии изготовления и конструирования аперийодического пьезодатчика. — Дефектоскопия, 1975, № 2, с. 127—128.
 61. **Шрайбер Д. С.** Ультразвуковая дефектоскопия. М., Metallургия, 1965, 391 с.
 62. **Vommel H. C., Dransfeld K.** Generation of superhighfrequency phonons. Phys. Rev. Lett., 1958, 1, p. 234—241.
 63. **Carome E. F., Parks P. E., Mraz S. J.** Generation of short pressure waves. Journ. Acoust. Soc. Amer., 1964, 36, p. 946—952.
 64. **Firestone F., Frederick I.** Refinements in supersonic reflectoscopy. Journ. Acoust. Soc. Amer., 1964, 18, № 1, p. 200—212.
 65. **Jacobsen E. N.** Sources of sound in piezoelectric crystals. Journ. Acoust. Soc. Amer., 1960, 32, p. 949—953.
 66. **Martin R.** Ultrasonic techniques for "On-line" thickness measurements. British Journ. of N. D. T., 1970, p. 79—83.
 67. **Peterson R. G., Rosen M.** Use of thick transducers to generate short-duration stress pulses in thin specimens. Journ. Acoust. Soc. Amer., 1967, 41, p. 336—345.
 68. **Redwood M.** A study of waveforms in the generations and detections of short ultrasonic pulses. Journ. Appl. Mater. res. 1963, 2, p. 76—84.
 69. **Redwood M.** Experiments with the electrical analog of a piezoelectric transducer. Journ. Acoust. Soc. Amer., 1964, 36, p. 1872—1880.
 70. **Redwood M.** Piezoelectric generations of an electrical impulse. Journ. Acoust. Soc. Amer., 1961, 33, p. 1386—1390.
 71. **Redwood M.** Transient performance of a piezoelectric transducer. Journ. Acoust. Soc. Amer., 1961, 33, p. 527—536.
 72. **Salvini G.** Calcul des regimes transitoires ultrasonores et synthese d'impulsions particulieres., Acad. Sci, 1970, 270, p. 991—993.
 73. **Walter K.** Ultrasonic thickness measurements, Technica (Suisse), № 10, 1970, p. 857—863.

Предисловие	3
Г Л А В А I. Эхо-импульсный метод измерения толщины . .	6
1. Разновидности акустического тракта эхо-импульсных толщиномеров	6
2. Точность эхо-импульсных толщиномеров	9
3. Диапазон измеряемых толщин	13
Г Л А В А II. Электроакустический тракт эхо-импульсных тол- щиномеров	17
1. Примеры практических схем электроакустического тракта с раздельно-совмещенными пьезопреобразова- телями	17
2. Методы повышения разрешающей способности эхо- импульсных толщиномеров	20
3. Аперiodические пьезопреобразователи	33
4. Примеры практических схем электроакустического тракта с аперiodическим пьезопреобразователем	60
5. Применение усилителей тока в электроакустическом тракте	69
6. Разрешающая способность эхо-импульсных толщино- меров с аперiodическими пьезопреобразователями	72
Г Л А В А III. Современные эхо-импульсные толщиномеры . .	75
1. Область применения и основные характеристики эхо- импульсных толщиномеров	75
2. Практические примеры построения эхо-импульсных толщиномеров	75
3. Перспективы совершенствования эхо-импульсных тол- щиномеров	97
Приложение	105
Список литературы	107

ИБ № 3043

Михаил Викторович Королев

ЭХО-ИМПУЛЬСНЫЕ ТОЛЩИНОМЕРЫ

Редактор *Григорин-Рябова Е. В.*
Технический редактор *Чистякова Н. Н.*
Корректор *Богомолова Н. Г.*

Сдано в набор 27.11.79. Подписано в печать 13.02.80. Т-00756
Формат 84×108/32. Бумага типографская № 2. Гарнитура литера-
турная. Печать высокая. Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 7,4.
Тираж 4300 экз. Заказ № 1736. Цена 35 к.

Издательство «Машиностроение»,
107885, Москва, ГСП-6, 1-й Басманный пер., 3

Московская типография № 32 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли.
Москва, 103051, Цветной бульвар, 26.

35 коп.



«МАШИНОСТРОЕНИЕ»