

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ

*А.В. Данюк, И.А. Растегаев, Д.Л. Мерсон, А.Ю. Виноградов*

Предложена конструкция пьезоэлектрического преобразователя акустической эмиссии (АЭ) повышенной надежности, которая достигается устранением основных причин, приводящих к отказам; дублированием/резервированием основных рабочих систем и приданием конструкции преобразователя избыточных или расширенных технических возможностей, позволяющих компенсировать частичную или полную потерю работоспособности антенной группы. Показано, что при таком конструктивном подходе возможно достичь технические характеристики, установленные для преобразователей акустической эмиссии промышленного применения. Представлена теоретическая оценка надежности преобразователя, показывающая, что совместное сочетание резервирования каналов регистрации АЭ с вариантами их подключения дает широкие возможности управления надежностью датчиков в процессе их применения/эксплуатации.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль, акустическая эмиссия, пьезоэлектрический преобразователь, акустический датчик, надежность, ресурс.

### ВВЕДЕНИЕ

Преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ) в составе систем мониторинга технического состояния опасных промышленных объектов (ОПО) устанавливаются стационарно непосредственно на объект контроля и эксплуатируются в непрерывном режиме. Окружающие условия работы ПАЭ на ОПО включают широкий спектр негативного воздействия: перепад температур, вибрацию, влагу, пыль и агрессивную среду. На практике всегда присутствует сочетание некоторых факторов из вышеприведенного спектра негативных воздействий, поэтому ПАЭ систем мониторинга зачастую работают на границе допустимых параметров эксплуатации, из-за чего их ресурс существенно сокращается и может оказаться менее межремонтного периода ОПО. В случае конструктивной возможности и доступности для замены ПАЭ данный вопрос не является актуальным. Однако в случае недоступности ПАЭ для обслуживания или их замены из-за невозможности проведения демонтажных/монтажных операций на работающем оборудовании необходимо обеспечить ресурс его работы, сопоставимый со сроком службы ОПО или хотя бы с периодичностью технического диагностирования. Таким образом, следует обратить внимание на требование повышенной надежности, что на современном этапе развития конструкций ПАЭ является проблемным вопросом [1]. Анализ известных технических решений показал, что в основном при разработке ПАЭ основополагающими целями являлись повышение чувствительности частотной характеристики и ее выравнивание, повышение помехоустойчивости и снижение собственных шумов, возможность определения координат источника акустической эмиссии одним ПАЭ, при этом требование повышенной надежности не являлось приоритетным. В данной работе приведено описание необслуживаемого ПАЭ повышенной надежности (ПАЭПН), разработанного для контроля внутренних резервуаров криогенных ОПО, работающих при температуре от  $-65$  до  $65$  °С. Однако область его применения не ограничивается указанными резервуарами. ПАЭПН в принципе может быть использован для контроля любого вида промышленного оборудования, работающего в условиях жесткой эксплуатации, где выдвигаются повышенные требования к надежности датчиковой аппаратуры.

### КОНЦЕПЦИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПАЭ

Безусловно, достичь абсолютной надежности ПАЭ принципиально невозможно, однако существенно повысить их показатели реально. Причем добиваться этого желательно такими техническими решениями, которые позволяли бы управлять надежностью изделия в процессе его применения/эксплуатации. Для этого предложены следующие конструкторские меры: во-первых,

---

Алексей Валериевич Данюк, ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет», начальник отдела лаборатории НИО-2 НИИ «Прогрессивных технологий». Тел. 8-8482-53-92-83. E-mail: alvdan@mail.ru

Игорь Анатольевич Растегаев, канд. физ.-мат. наук, ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет», старший научный сотрудник НИО-2 НИИ «Прогрессивных технологий». Тел. 8-8482-53-92-83. E-mail: RastlgAev@yandex.ru

Дмитрий Львович Мерсон, доктор физ.-мат. наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет», директор НИИ «Прогрессивных технологий». Тел. 8-8482-53-91-96. E-mail: d.merson@tltsu.ru

Алексей Юрьевич Виноградов, канд. физ.-мат. наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет», научный руководитель НИО-2 НИИ «Прогрессивных технологий». Тел. 8-8482-54-63-03. E-mail: alexei.vino@gmail.com

устранение известных причин, приводящих к отказам, то есть сведение к минимуму или полной ликвидации, если это возможно, известных конструкторских, технологических и эксплуатационных ошибок; во-вторых, повышение надежности дублированием/резервированием основных рабочих систем и элементов; в-третьих, придание конструкции ПАЭ избыточных или расширенных технических возможностей, позволяющих компенсировать частичную или полную потерю работоспособности антенной группы.

Анализ конструкций и причин поломок пьезоэлектрических преобразователей «традиционной» конструкции показал, что основными из них являются [2 — 6 и др.]:

- разрушение клеевых соединений пьезоэлемента (ПЭ);
- разрушение паяных соединений выводов и металлизации ПЭ;
- отказ предварительного усилителя (ПУ).

Основной причиной выхода из строя ПУ является отказ электронных компонентов, имеющих механические элементы, предназначенные для регулировки и настройки, или отказ элементов, имеющих узкий диапазон рабочих температур.

На основании анализа причин отказов пьезопреобразователей и в соответствии с выбранной концепцией повышения надежности предложена конструкция ПАЭПН, общая схема которой приведена на рис. 1.

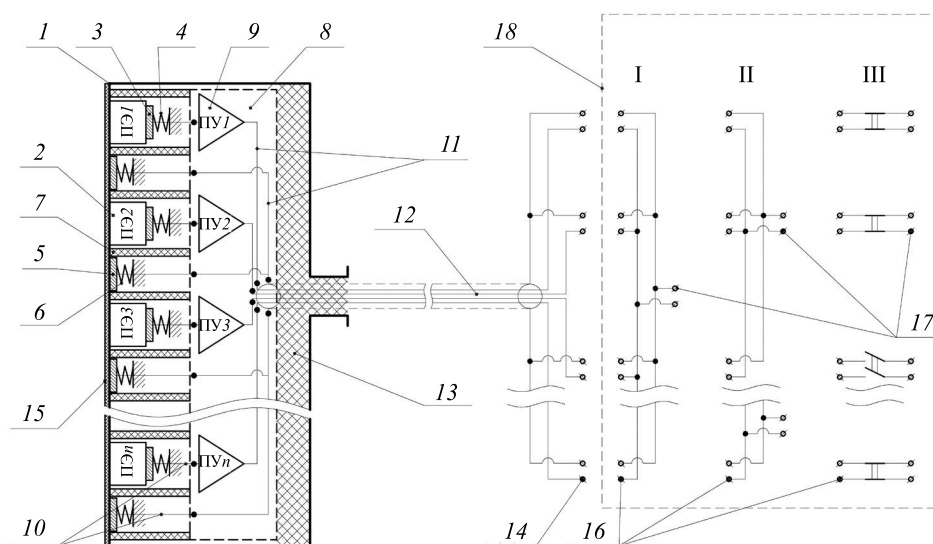


Рис. 1. Принципиальная схема повышения надежности ПАЭ.

Корпус ПАЭПН (1) выполняется герметично из материала, стойкого к агрессивным средам. В (1) по количеству  $n$  дублирующих линий (где  $n$  — любое целое число более трех) размещаются ПЭ (2), прямые (3) и обратные (5) контакты ПЭ, подпружиненные упругими элементами (4) и (6) соответственно и ПУ (9). Преобразующая часть ПАЭПН разделена неэлектропроводящими и акустически непрозрачными перегородками (7). Усиливающая часть состоит из электронных компонентов ПУ (9), которые связаны электропроводящими дорожками (11) и размещены на одной или нескольких общих платах ПУ (8). Связь между преобразующей и усиливающей частями ПАЭПН осуществляется с помощью максимально коротких гибких проводников (10) в электрозащитной оболочке. Подача питания для работы ПУ и передача АЭ-сигнала осуществляются по кабелю (12) защищенного исполнения. Проводники (10) с одной стороны припаиваются к плате ПУ, а с другой обжимаются в прямом (3) или обратном (5) контакте, а затем пропаиваются. Кабель (12) припаивается к выводам ПУ (8), выводится через кабельный вывод корпуса (1) и герметизируется весь свободный объем компаундом (13). С другой стороны на кабель (12) припаивается контактный разъем (14) для подключения к входу блока развязки сигнал/питание (БРСП) АЭ-системы (18) посредством контактных разъемов (16). После сборки проводники (10) не должны иметь натяжение и оставаться подвижными, а кабель (12) монтируется так, чтобы в герметизируемом объеме корпуса находился только кабель с неразделанной (целой) внешней защитной оболочкой. Для повышения помехозащищенности дублирующие линии экранируются корпусом (1) либо дополнительным экраном (обозначен штриховой линией).

При необходимости электрической развязки корпуса (1) с ОПО на контактной стороне наносится неэлектропроводящий акустически прозрачный слой (15). Он может выступать как электрический барьер в дополнение к доньшку корпуса (1), к которому с противоположной стороны прижимаются ПЭ (9), или в качестве несущего, когда корпус (1) выполняется без доньшка и ПЭ прижимаются непосредственно на слой (15), но в этом случае он с внутренней стороны корпуса должен обладать электропроводящими свойствами (металлизирован).

ПЭ (2) поджимаются к (1) через тонкий слой не коррозионной акустически прозрачной среды, не изменяющей своих качеств в рабочем температурном диапазоне ПАЭПН. Также возможен вариант, когда свободный объем корпуса (1) от контактной поверхности ПЭ (9) до платы ПУ (8) полностью заполняется контактной средой с высоким электрическим сопротивлением, что позволяет с большей гарантией обеспечивать надежный акустический контакт ПЭ (9) с корпусом (1) и повысить уровень искровзрывобезопасности ПАЭПН. Порядок расположения ПЭ (9) в корпусе ПАЭПН (1) может быть любым (например, равномерным по окружности, по квадратной, треугольной сеткам и т.д.) и не является принципиальным вопросом, так как вносимые данным решением искажения компенсируются поправками при расчете координат источников АЭ.

Материал, форма и размер ПЭ (2) и прямых контактов (3) подбираются с позиции придания ПАЭ требуемой (обычно нормируемой) чувствительности в заданном частотном диапазоне. Важными моментами здесь являются идентичность исполнения и монтажа элементов позиций (2), (3), (4), (5), (6) и (9) на всех дублирующих каналах и выбор материалов с точки зрения максимальной длительности периода деградации исходных свойств.

Далее управление режимом работы ПАЭ и повышение надежности антенной группы осуществляются способом подключения дублирующих линий ПАЭПН в БРСП АЭ-системы (18), а итоговый сигнал для анализа в АЭ-систему подается с выходного разъема БРСП (17).

Рассмотрим преимущества данного технического решения на примере ПАЭПН, имеющего три дублирующие линии при мониторинге цилиндрической обечайки ОПО.

На объекте контроля из нескольких ПАЭПН формируются плоскостные локационные антенны в соответствии с требованиями [7] (рис. 2а), включающие три ПАЭПН в группе, расстояние между которыми в антенной группе выбирается таким, чтобы каждый ПАЭПН был в зоне устойчивой «слышимости» соседнего ПАЭПН (зоны, ограниченные штриховыми линиями). Акустическая волна, распространяющаяся от источника АЭ (активного дефекта) по ОПО, достигая контактной поверхности ПАЭПН (рис. 3 и 1), попадает на каждый ПЭ (9) в порядке их близости к источнику.

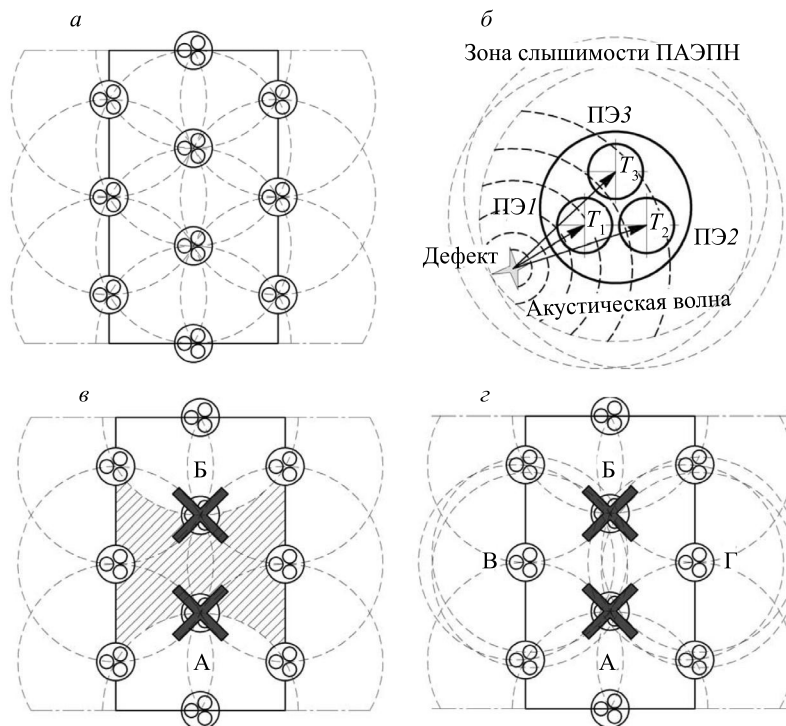


Рис. 2. Поясняющие рисунки к описанию повышения надежности за счет расширения технических возможностей, позволяющих компенсировать потерю работоспособности ПАЭ в антенной группе и принципа локации одним ПАЭПН.

Поэтому процесс формирования электрического сигнала АЭ и его передача по всем дублирующим линиям происходят одинаково и параллельно, но с некоторой временной задержкой ( $\Delta T$ ), равной разности времен прихода (РВП) акустической волны на каждый ПЭ (9) (для нашего примера —  $\Delta T_{12} = T_2 - T_1$  и  $\Delta T_{13} = T_3 - T_1$  (см. рис. 2б)), что позволяет реализовать локацию источников АЭ одним ПАЭПН. При этом полярность всех ПЭ в ПАЭПН должна быть одинакова. А далее вид выходных данных с ПАЭПН зависит от способа подключения дублирующих линий в БРСЦ (18). Возможны следующие три основных режима работы ПАЭПН, влияющих на его надежность и надежность всей антенной группы.

I. Суммирование сигнала в общей точке по всем дублирующим линиям ПАЭПН (см. рис.1). При данном подключении на выходном разьеме (17) блока разделения сигнал/питание АЭ-системы (18) формируется сигнал АЭ в виде суммы сигналов, снятых со всех ПЭ (9). Основным преимуществом способа подключения I является повышение живучести ПАЭПН за счет более низкой вероятности одновременного выхода из строя нескольких параллельно работающих линий регистрации АЭ, так как закон вероятности отказа электронных средств ( $P$ ) в течение времени ( $t$ ) меняется от закона (1) [8] к закону (2) [9]:

$$P_0(t) = e^{-\Lambda t}; \quad (1)$$

$$P_1(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\Lambda_i t}), \quad (2)$$

где  $\Lambda_i$  — эксплуатационная интенсивность отказа  $i$ -го элемента;  $n$  — количество параллельно соединенных дублирующих линий.

Данная схема подключения позволяет реализовать следующие эффекты, связанные с интерференцией акустических волн: дополнительное усиление сигнала в рабочем диапазоне частот, снижение шума, выравнивание амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ПАЭПН. Недостатком данного способа подключения является то, что при выходе из строя дублирующих линий снижается амплитуда выходного сигнала ПАЭПН, а также теряется возможность определить координаты источника АЭ одним ПАЭПН. Последнее означает, что при выходе из строя одного или нескольких ПАЭПН на локационной карте объекта контроля образуется «мертвая зона», где невозможно установить местоположение источника АЭ (заштрихованная зона на рис. 2в).

II. Суммирование сигнала в общей точке по нескольким резервирующим линиям ПАЭПН (см. рис. 1). При данном виде подключения при всех преимуществах способа подключения I можно исключить его недостаток, то есть провести локацию источника АЭ одним ПАЭПН. Недостатком данного способа подключения является необходимость применения избыточного числа каналов АЭ-системы, так как для измерения РВП требуется не менее трех (для двумерной локации) и двух (для линейной локации) каналов, каждый из которых резервируется минимум двумя линиями, что сказывается и на габаритах, и на массе ПАЭПН. При схеме подключения II закон вероятности отказа электронных средств ( $P$ ) в течение времени ( $t$ ) описывается выражением (3) [9]

$$P_{II}(t) = \sum_{i=k}^n \frac{n!}{(n-i)! \cdot i!} \cdot (e^{-\Lambda_i t})^i \cdot (1 - e^{-\Lambda_i t})^{n-i}, \quad (3)$$

где  $\Lambda_i$  — эксплуатационная интенсивность отказа  $i$ -го набора резервирующих линий ПАЭПН;  $n$  — общее количество параллельно соединенных резервирующих линий ПАЭПН;  $k$  — минимальное количество исправных резервирующих линий, необходимых для работы ПАЭПН.

III. Раздельный вывод сигнала по каждой дублирующей линии (см. рис. 1). При данном виде подключения возможно программно обеспечить преимущества схем I и II (путем суммирования сигналов при обработке АЭ-информации), а также попеременно включать/выключать в работу/из работы дублирующие линии. Таким образом, в ПАЭПН работает одна или часть дублирующих линий, а остальные находятся в режиме ненагруженного резерва, что обеспечивает их сохранность. Кроме этого, способ подключения III позволяет обеспечить возможность определения координат источников АЭ одним ПАЭПН с минимальным количеством замещающих линий (начиная с двух при линейной локации и с трех — при плоскостной), то есть минимизировать габариты и вес ПАЭПН. Недостатками данного способа являются потребность в большем количестве проводных линий и входных каналов АЭ-системы и меньшая помехозащищенность, увеличение объема данных и количества математических операций, а значит необходимость применения в АЭ-системе более производительных ЭВМ с большими объемами памяти для хранения данных. При схеме подключения III закон вероятности отказа электронных средств ( $P$ ) в течение времени ( $t$ ) описывается выражением (4) [9]

$$P_{III}(t) = (e^{-\Lambda t}) \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\Lambda \cdot t)^i}{i!}, \quad (4)$$

где  $\Lambda$  — эксплуатационная интенсивность отказа линии ПАЭПН;  $n$  — общее количество дублирующих линий ПАЭПН;  $i$  — порядковый номер замещающей линии ПАЭПН,  $i = 0 \dots n$ .

Кроме указанных основных режимов работы ПАЭПН, для повышения надежности возможно реализовать и дополнительные варианты, которые представляют собой различные сочетания соединения ПАЭПН в антенной группе. Например, ПАЭПН эксплуатируется в режиме работы, обеспечиваемом способом подключения I, до выхода из строя двух ПАЭПН в локационной антенне (А и Б на рис. 2в). Как только при периодических тестовых проверках обнаруживается потеря работоспособности ПАЭПН А и Б, то переключается необходимое количество ПАЭПН (В, Г на рис. 2з) в режим II или III для исключения образования зон с невозможностью определения местоположения источника АЭ (заштрихованная зона на рис. 2в). Все остальные ПАЭПН при этом могут оставаться в режиме работы I. Возможны и другие варианты, однако в их перечислении нет смысла, так как все они реализуются на базе основных вариантов подключения I, II и III.

### АПРОБАЦИЯ ПРЕДЛОЖЕННОЙ КОНЦЕПЦИИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПАЭ

Для экспериментальной оценки работоспособности предлагаемой конструкции была изготовлена опытная партия (десять экземпляров) ПАЭПН с тремя дублирующими линиями, общий вид и схема исполнения которых представлены на рис. 3.

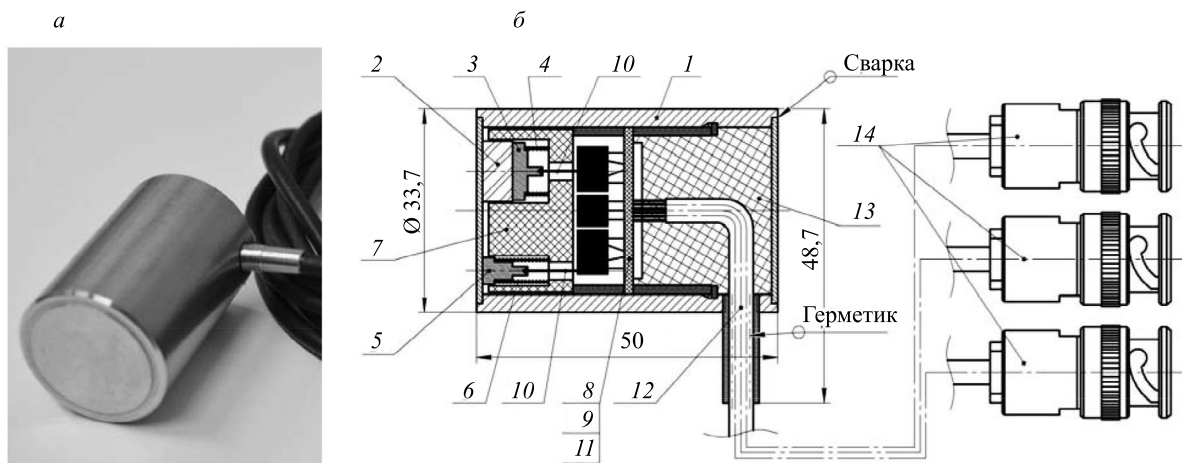


Рис. 3. Общий вид (а) и схема исполнения экспериментального образца ПАЭПН с тремя дублирующими линиями (б).

Номера позиций на рис. 3 совпадают с описанием, приведенным для рис. 1, поэтому здесь лишь отметим ключевые особенности исполнения: корпус (1) диаметром  $33,7 \times 50$  мм из нержавеющей стали 08X18N10T; ПЭ (2) диаметром  $8 \times 10$  мм, ЦТС-19; контакты (3) и (5) из латуни Л-63; компаунд (13) — СИЭЛ 159-356Б; ПУ (9) — двухкаскадные усилители напряжения с высоким входным сопротивлением (не менее 5 МОм), построенные на минимуме дискретных элементов широкого температурного диапазона применения, не требующих подстройки (входной каскад выполнен на полевом транзисторе с управляющим  $p-n$ -переходом по схеме с общим истоком, выходной каскад — по схеме с общим эмиттером с нагрузкой в цепи коллектора, включенной на стороне источника питания). Акустическая связь элементов (1) и (2) осуществляется через силиконовое масло ПМС-200. Контакты (3) выполнены увеличенной толщины и являются акустическими демферами ПЭ (2). Для выполнения требований взрывозащиты уровня «и» [10] напряжение питания ПУ (9) составляет 12 В, ток потребления ПУ — 100 мА, электрическая емкость ПАЭПН с ПУ и кабелем — не более 10 мкФ. Контактные разъемы (14) могут быть в любом исполнении, в нашем случае использовали разъемы типа BNC.

Экспериментальная оценка работоспособности ПАЭПН заключалась в определении основных рабочих характеристик ПАЭ, нормированных [11] на калибратор MSAE-USA-01 [12] в температурном диапазоне от  $-65$  до  $65$  °С. Нагрев и охлаждение ПАЭПН проводили в этаноле с помощью жидкостного криотермостата LIOP FT-311-80, что позволило оценить температурную стабильность и герметичность ПАЭПН. По результатам испытаний в указанном температурном диапазоне

не обнаружено критического изменения основных рабочих характеристик ПАЭПН, которые составили следующие величины: полоса пропускания 20—175 кГц, коэффициент преобразования для продольных волн  $(696 \pm 58) \cdot 10^6$  В/м, резонансы АЧХ 30, 60 и 120 кГц. Отказов в работе ПАЭПН за время испытаний не было, но зафиксированы следующие важные моменты, связанные с предлагаемым конструктивным решением. При подключении по схемам I и II необходимо, чтобы расстояние между ПЭ (2) было не более половины длины волны максимальной рабочей частоты ПАЭПН, в противном случае сигналы с дублирующих линий оказываются в противофазе и вычитаются (потеря чувствительности). При отказе одного из трех дублирующих линий происходит падение амплитуды сигнала на  $4 \pm 2$  дБ с сохранением полосовой частотной характеристики ПАЭПН, при отказе двух из трех дублирующих линий — на  $9 \pm 3$  дБ с переходом на резонансную АЧХ с максимумами на основных частотах (30, 60 и 120 кГц).

Оценка повышения надежности ПАЭ предложенной конструкции проведена по зависимостям (1) — (4). При этом для максимального приближения к реальности эксплуатационную интенсивность отказов дублирующей линии ( $\Lambda$ ) ПАЭПН определяли по известной статистике отказов входящих в его конструкцию элементов в температурном диапазоне от  $-65$  до  $65$  °С по формуле (5) [8, 13]

$$\Lambda = \sum_1^q \lambda_{eq} \cdot N_q, \quad (5)$$

где  $q$  — количество типов расчетных элементов в дублирующей линии ПАЭПН;  $N_q$  — количество  $q$ -го элемента в одной линии ПАЭПН;  $\lambda_{eq}$  — эксплуатационная интенсивность отказа  $q$ -го элемента ПАЭПН. Так как в датчике использованы только типовые элементы (массовое производство) с простым конструктивным исполнением, то  $\lambda_{eq}$  определяли исходя из следующей обобщенной математической модели прогнозирования эксплуатационной безотказности [8, 13]:

$$\lambda_e = \lambda_0 \cdot \prod_{j=1}^m K_j, \quad (6)$$

где  $\lambda_0$  — базовая (справочная) интенсивность отказа элемента ПАЭПН с учетом как внезапных, так и постепенных отказов;  $K_j$  — поправочный коэффициент, учитывающий влияние различных факторов на безотказность элемента ПАЭПН;  $m$  — количество факторов, принятых во внимание из числа влияющих на безотказность элементов. Конкретный вид математической модели в виде формулы (6) и количество влияющих на безотказность факторов  $m$  выбирали по рекомендациям, приведенным в [8, 13] для каждого типа/класса и группы элемента ПАЭПН. Основные результаты расчета, численно отражающие повышение надежности при нескольких вариантах применения предлагаемой конструкции ПАЭПН, приведены в таблице. Для примера за время безотказной эксплуатации взят срок полного технического освидетельствования изотермических резервуаров сжиженных газов — 10 лет согласно [14].

#### Вероятность безотказной работы ПАЭПН в зависимости от количества дублирующих линий и способа их подключения

Количество дублирующих линий в ПАЭПН и схема подключения	Вероятность безотказной работы в течение 10 лет при рабочей температуре ПАЭПН, °С				
	65	25	0	-35	-65
ПАЭ без дублирующих линий (одна линия регистрации ПАЭПН)	0,2830	0,4124	0,4853	0,4483	0,3699
ПАЭПН с тремя дублирующими линиями, подключенными по схеме I	0,6315	0,7971	0,8636	0,8320	0,7499
Четыре ПАЭПН с тремя дублирующими линиями, подключенными по схеме I, при минимальном количестве рабочих ПАЭПН, равном двум	0,8551	0,9716	0,9908	0,9834	0,9491
ПАЭПН с тремя дублирующими линиями, подключенными по одному ПЭ в одну рабочую и две резервные линии по схеме III	0,8657	0,9394	0,9630	0,9522	0,9207
ПАЭПН с четырьмя дублирующими линиями, подключенными по схеме I	0,7358	0,8808	0,9298	0,9073	0,8424
ПАЭПН с шестью дублирующими линиями, подключенными по схемам I или II	0,8642	0,9588	0,9814	0,9718	0,9374
ПАЭПН с шестью дублирующими линиями, подключенными по трем ПЭ в одну рабочую и одну резервную линии по схемам II и III	0,9217	0,9778	0,9902	0,9850	0,9657
ПАЭПН с девятью дублирующими линиями, подключенными по схемам I или II	0,9499	0,9916	0,9974	0,9952	0,9843
ПАЭПН с девятью дублирующими линиями, подключенными по трем ПЭ в одну рабочую и две резервные линии по схемам II и III	0,9884	0,9983	0,9995	0,9990	0,9967

## ВЫВОДЫ

Экспериментальная оценка характеристик ПАЭПН показала, что благодаря предложенному конструктивному подходу возможно повышение надежности с одновременным обеспечением требований [11], обязательных для ПАЭ промышленного применения. Теоретическая оценка надежности ПАЭПН показала, что совместное сочетание резервирования каналов регистрации АЭ с вариантами их подключения дает широкие возможности управления надежностью ПАЭ в процессе их применения. Учитывая, что в предлагаемой конструкции дублирование происходит в одном ПАЭ, то (по сравнению с реализацией этого же подхода с применением нескольких рядом установленных ПАЭ с ПУ) предлагаемая конструкция позволяет максимально сократить количество общих элементов (например, корпусов, плат, креплений и т.д.) и герметизируемых разъемов. Следовательно, достигается результат при меньшей себестоимости канала регистрации АЭ. Кроме этого, предлагаемый подход позволяет реализовать локацию источников АЭ одним ПАЭ в так называемом режиме «зонного контроля» [7]. Последнее актуально в связи с участвовавшими в настоящее время обсуждениями вопроса о сокращении каналов регистрации/стоимости АЭ-систем мониторинга крупнотоннажного оборудования за счет перехода от полного контроля ОПО к контролю только опасных/нагруженных их частей в «зонном» режиме. В этом случае ПАЭПН позволит не только идентифицировать наличие источника АЭ, но и обеспечит определение его координат.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Проект прикладных научно-экспериментальных разработок № RFMEFI57714X0145.

Тольяттинский государственный  
университет

Поступила в редакцию  
21 апреля 2016 г.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ханухов Х.М., Алипов А.В., Зимина С.В., Симонов И.И. Особенности соблюдения требований промышленной безопасности при проектировании изотермических резервуаров. — Безопасность труда в промышленности, 2011, № 12, с. 57—64.
2. Богущ М.В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электроупругих моделей. — М.: Техносфера, 2014.— 312 с.
3. Шаратов В.М., Мусиенко М.П., Шаратова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. — М.: Техносфера, 2006.— 632 с.
4. Шаратов В.М., Минаев И.Г., Бондаренко Ю.Ю., Кисиль Т.Ю. и др. Пьезоэлектрические преобразователи. — Черкассы, ЧГТУ, 2004.— 435 с.
5. Домаркас В.И., Кажис Р.-И.Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. — Вильнюс: Минтис, 1974.— 258 с.
6. Gautschi G. Piezoelectric sensors: force, strain, pressure, acceleration and acoustic emission sensors, materials and amplifiers. — Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002.— 264 p.
7. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. — М.: ПИО ОБТ, 2003.
8. Боровиков С.М., Цырельчук И.Н., Троян Ф.Д. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств. — Минск, БГУИР, 2010.— 68 с.
9. Акимов В.А., Лапин В.Л., Попов В.М., Пучков В.А. и др. Надежность технических систем и техногенный риск. — М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002.— 368 с.
10. ГОСТ Р 52350.0—2005. Электрооборудование для взрывоопасных газовых сред. Общие требования. — М.: Стандартиформ, 2005.
11. РД 03-300-99. Требования к преобразователям акустической эмиссии, применяемым для контроля опасных производственных объектов. — М.: ПИО ОБТ, 2002.
12. Lazarev S., Mozgovoi A., Vinogradov A., Lazarev A., Shvedov A. Electromagnetic method of elastic wave excitation for calibration of acoustic emission sensors and apparatus. — J. Acoustic Emission, 2009, № 27, p. 212—223.
13. Ямпурин Н.П., Баранова А.В. Основы надежности электронных средств. — М.: Изд. центр «Академия», 2010.— 240 с.
14. РД 03-410-01. Инструкция по проведению комплексного технического освидетельствования изотермических резервуаров сжиженных газов. — СПб.: ЦОТПБСППО, 2007.