

НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 621.37

РАДИОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ЗАЩИТНЫХ КОНТЕЙНЕРОВ С ОПАСНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ

© 2023 г. С. П. Дорохов^{a, *}, А. С. Койгеров^b, С. С. Андрейчев^c, А. А. Бадыгеев^d, В. А. Козлов^a,
М. П. Кужель^d, Е. П. Пономарева^d, А. С. Прахов^a, В. Р. Реут^c, А. С. Салов^a

^aФилиал “Российского федерального ядерного центра — Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики” “Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова”,
ул. Тropicина, 47, Нижний Новгород, 603137 Российская Федерация

^bСанкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина),
ул. проф. Попова, 5, Санкт-Петербург, 197376 Российская Федерация

^cНаучно-производственное предприятие “АЭК-Дизайн”,
Ленинский просп., 140 литер Б, Санкт-Петербург, 198216 Российская Федерация

^d“Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики”, просп. Мира, 37, Саров, 607188 Российская Федерация

*E-mail: dorokhov@inbox.ru

Поступила в редакцию 30.04.2022 г.

После доработки 31.10.2022 г.

Принята к публикации 02.11.2022 г.

Представлены результаты разработки радиочастотной системы дистанционного мониторинга состояния защитных контейнеров с опасными веществами на основе энергонезависимых транспондеров, которые обеспечивают оценку всей совокупности показателей состояния упакованного груза. Показан принцип работы системы. Рассмотрена конструкция транспондера, содержащего радиометку на поверхностных акустических волнах на основе многополоскового ответвителя, обеспечивающую коммутацию сигналов с датчиков физических воздействий, передачу идентификационных данных объекта и достоверной информации о текущем состоянии изделия в момент проведения опроса. Приведены экспериментальные характеристики импульсных откликов радиометок. Представлена практическая реализация системы радиочастотного мониторинга, прошедшей государственные испытания.

DOI: 10.31857/S0033849423050066, EDN: UHPJWQ

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшим аспектом обеспечения безопасности при эксплуатации опасных веществ (ОВ) (взрывчатых, химических, радиоактивных) и обращении с ними является организация их мониторинга в процессе изготовления, перемещения и хранения. Транспортирование и временное хранение ОВ, а также изделий на их основе осуществляется в специализированных защитных контейнерах (ЗК) [1]. В случае возникновения аварийных ситуаций в процессе их эксплуатации особенно актуальна возможность осуществления бесконтактного (дистанционного) мониторинга ЗК, перспективным направлением которого является разработка систем, в которых вся необходимая информация об объекте и воздействиях на него в процессе эксплуатации считывается дистанционно с энергонезависимого транспондера, установленного на каждом объекте.

Цель данной работы — разработать радиочастотную систему дистанционного мониторинга состояния ЗК с ОВ на основе энергонезависимых транспондеров, обеспечивающих оценку всей совокупности показателей состояния упакованного груза, которое содержит идентификационные данные контейнера, данные о целостности системы пломбирования, а также информацию о состоянии датчиков контроля физических воздействий.

1. ПРИНЦИП РАБОТЫ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ВОЗМОЖНОСТЬ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Радиочастотная система дистанционного мониторинга состояния объектов повышенной опасности состоит из двух функционально самостоятельных частей: считывающего устройства (базовой станции) и транспондера (рис. 1).

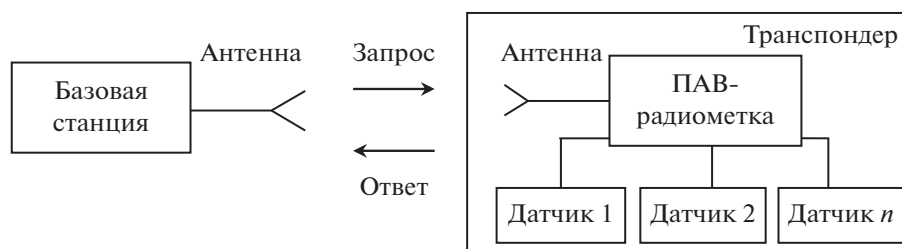


Рис. 1. Структурная схема системы дистанционной идентификации и контроля.

Приемопередающий блок базовой станции по радиоканалу производит опрос транспондера посредством периодической последовательности импульсных сигналов. В ответ на каждый из импульсов запроса транспондер переизлучает уникальную кодовую последовательность импульсов, идентифицирующую данный транспондер и регистрирующую текущее состояние его датчиков. Принятый базовой станцией ответный сигнал дешифруется блоком обработки, записывается на внутренний носитель информации, выводится на дисплей и передается на диспетчерский пункт для сопоставления с исходными данными.

Среди различных конструктивных исполнений транспондеров особого внимания заслуживают устройства, где в качестве радиометки применяется линия задержки (ЛЗ) на поверхностных акустических волнах (ПАВ) (ПАВ-радиометка), преимущество которой заключается в энергонезависимости и устойчивости к различным дестабилизирующим факторам, таким как воздействие ионизирующих излучений, ударных перегрузок и температурных воздействий в широком диапазоне. Радиометки на ПАВ [2–4] и беспроводные датчики на ПАВ [5–10] решают задачи идентификации и измерения параметров окружающей среды для различных приложений, начиная с отдельных автономных датчиков и заканчивая системами промышленной автоматизации.

Идея осуществления мониторинга заключается в том, чтобы каждый контейнер был снабжен пассивным устройством (транспондером) [11], обеспечивающим оценку всей совокупности показателей состояния упакованного груза, которое содержит информацию о номере контейнера, целостности системы пломбирования, данные с датчиков контроля физических воздействий. Опрос транспондера осуществляется с помощью специального считывающего устройства, позволяющего получить информацию о реальном состоянии каждого контейнера в данный момент.

Схема организации мониторинга системой дистанционной идентификации и контроля состояния защитного контейнера (СДИК-ЗК) представлена на рис. 2.

Чтобы определить переизлученный зашифрованный сигнал транспондера, его необходимо обнаружить на фоне шумов с максимальной вероятностью правильного обнаружения $P_{об}$ при заданной вероятности ложной тревоги $P_{л.т.}$ В схемах оптимальных обнаружителей импульсных сигналов для повышения возможностей обнаружения сигнала используется интегрирование видеосигналов. При этом можно получить высокую вероятность обнаружения даже в тех случаях, когда отношение сигнал/шум близко к единице.

Для упрощения регистрации принимаемых обнаружителем сигналов целесообразно использовать вместо аналоговых методов интегрирования видеосигналов метод двоичной (бинарной) обработки сигналов, называемый методом обнаружения по совпадению [12, 13]. Этот метод обработки носит также наименование “К” из “N”.

При использовании метода обнаружения по совпадению в рассматриваемой системе, для селекции переизлученного транспондером сигнала, необходимо ввести временную селекцию. Для обнаружения сигнала транспондера временной интервал приема сигнала разбивается на независимые зоны с помощью стробирующих импульсов. Временная и бинарная обработка принимаемого сигнала проводится в каждой зоне.

Структурная схема устройства обнаружения сигнала приведена на рис. 3.

Входной сигнал в считывателе после детектирования поступает на видеоусилитель-квантователь (ВУК) с пороговым уровнем $U_{пор}$. Квантованный сигнал поступает на первый вход схемы совпадения, а на второй вход схемы совпадения поступает последовательность из n стробирующих импульсов, делящая временной интервал входного сигнала на n каналов. Импульсы совпадения с выхода селектора поступают на счетчики каналов. После окончания излучения пачки зондирующих импульсов результат счета поступает в решающее устройство, где происходит поканальное сравнение количества накопленных импульсов N с пороговым значением K .

С выхода схемы обнаружения сигнала n -рядный код поступает на схему дешифрации и высвечивается в десятичном виде на световом ин-

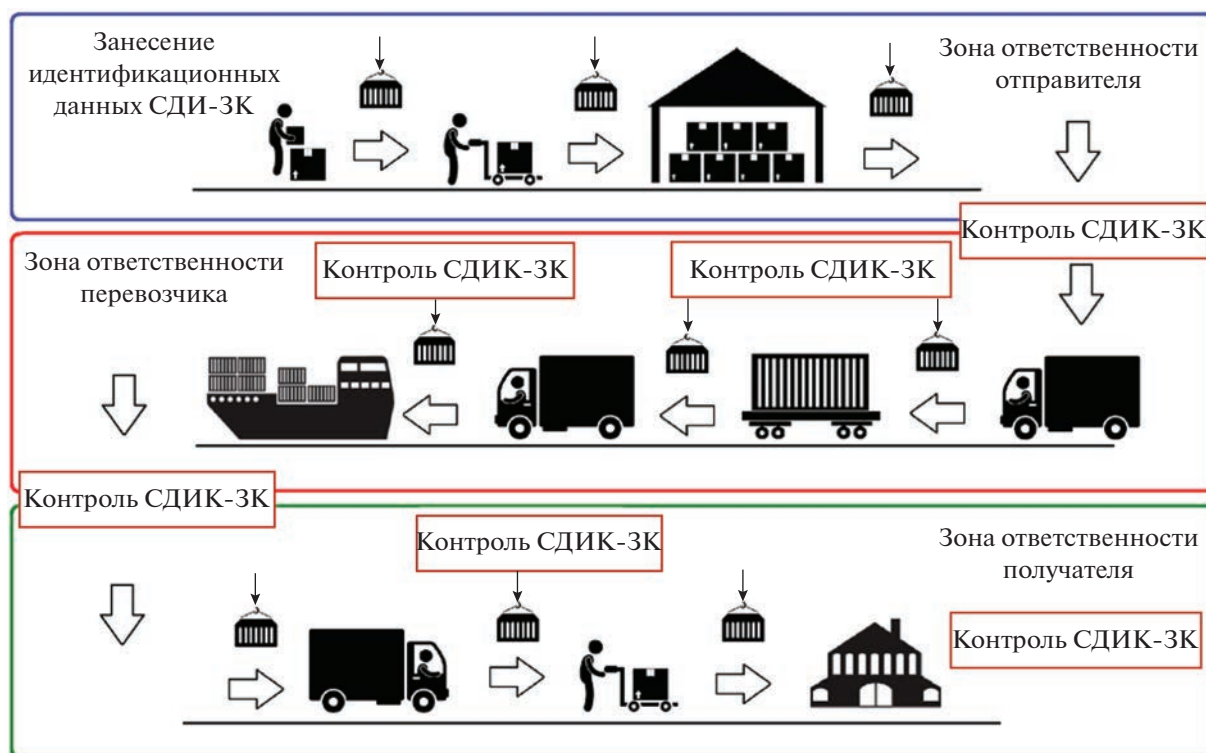


Рис. 2. Схема проведения контрольных и промежуточных опросов ЗК при полном цикле обращения с ними.

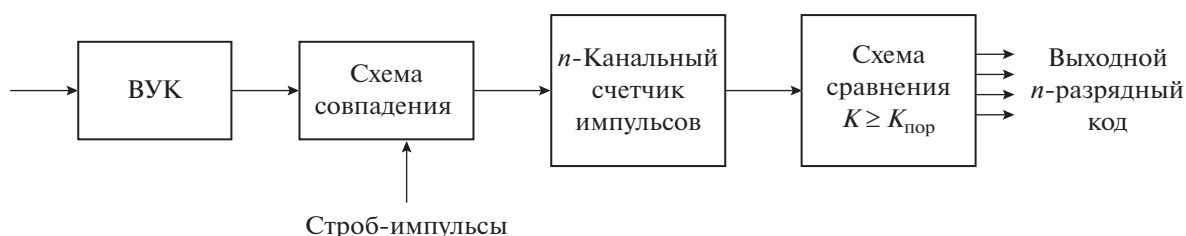


Рис. 3. Структурная схема устройства обнаружения сигнала.

дикаторе. Применение бинарной обработки позволяет объединить блок обработки информационного сигнала и блок управления считывателя в один блок, с использованием многофункционального быстродействующего контроллера.

Поскольку мощность передатчика ограничена, с одной стороны, санитарными нормами, изложенными в [14], с другой – требованиями по работе в автономном режиме от внутреннего источника питания и обеспечения массогабаритных параметров считывателя, а характеристики эффективности антенн находятся на предельных значениях, возможности улучшения характеристик системы дистанционной идентификации лежат в области разработок транспондеров на основе ПАВ-радиометок.

В связи с тем, что транспондер на основе ПАВ-радиометки не имеет источников питания

(является пассивным элементом), рабочая дальность системы контроля и идентификации ограничивается электрическими характеристиками ПАВ-радиометки и антенны транспондера. Одним из основных параметров ПАВ-радиометки, позволяющих обеспечить требуемую дальность работы системы, является величина затухания ее информационного сигнала, которую можно определить из основного уравнения радиолокации с пассивным маяком [15], исходя из необходимого значения дальности идентификации. Применив реальные параметры составных частей радиочастотной системы дистанционной идентификации на основе транспондеров, содержащих ПАВ-радиометки, для рабочей дальности 10 м, получим, что затухание информационного сигнала ПАВ-радиометки должно составлять не более 48 дБ.

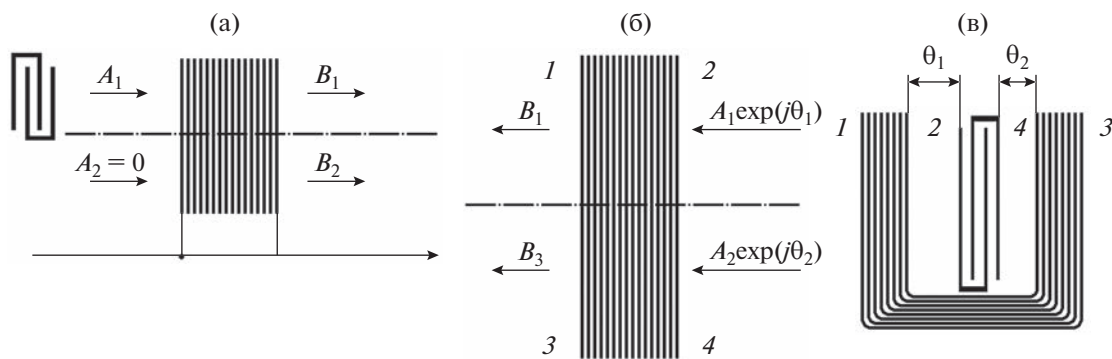


Рис. 4. Многополосковый ответвитель: а — традиционное исполнение; б — эквивалентная структура U-образного МПО в виде традиционного исполнения; в — однонаправленный преобразователь на основе U-образного МПО; 1–4 — вводы.

2. МНОГОКАНАЛЬНАЯ ПАВ-РАДИОМЕТКА НА ОСНОВЕ МНОГОПОЛОСКОВОГО ОТВЕТВИТЕЛЯ

Основными характеристиками ПАВ-радиометки являются ее информационная емкость и достоверность передаваемых данных. Для объектов, требующих особого контроля при их эксплуатации и хранении, необходима увеличенная информационная емкость ПАВ-радиометки, которая позволит объединить в своем кодированном сигнале идентификационные данные и данные, отвечающие за контроль внешних (в том числе несанкционированных) воздействий.

При обработке амплитудно-модулированного информационного сигнала главным параметром для обеспечения его достоверного распознавания является отношение сигнал/шум. Предложенная в [16] конструкция ПАВ-радиометки на основе многоканального входного преобразователя при всех своих преимуществах не позволяет полностью исключить влияние паразитных переотражений, формирование которых было подробно рассмотрено в [17].

Хорошим фильтром паразитных сигналов является многополосковый ответвитель (МПО), позволяющий минимизировать паразитный сигнал многократного прохождения [18]. Рассмотрим варианты исполнения электродных структур в виде МПО и представим конструкцию многоканальной ПАВ-радиометки, построенной на их основе.

Многополосковый ответвитель представляет собой систему электрически изолированных друг от друга тонких проводящих электродов, нанесенных на поверхность пьезоэлектрической подложки перпендикулярно направлению распространения ПАВ. Стоит отметить, что наибольший интерес для решения задачи по реализации многоканальной ПАВ-радиометки представляют амплитуды и фазы волн в двух каналах после прохождения МПО длины $x = L$, где L — длина взаимодействия.

Рассмотрим частный случай, когда входной сигнал имеется только в одном канале ($A_2 = 0$) (рис. 4а). В соответствии с [19] запишем

$$B_1 = A_1 \cos \varphi, \quad B_2 = -j A_1 \sin \varphi, \quad (1)$$

где

$$\varphi = \pi x / 2L, \quad (2)$$

$$L = \frac{2\lambda}{K^2} \left[\frac{\theta}{\sin \theta} \right]^2, \quad (3)$$

($\theta = \pi a / \lambda$, $K^2 \approx 0.05$ для LiNbO_3 [18]).

Выбирая длину L МПО, можно определять ту часть акустической энергии, которую необходимо передать во второй канал. При $\varphi = \pi/4$ ($x = L/2$) будет обеспечиваться условие равного деления энергии между каналами (j — мнимая единица):

$$B_1 = \frac{A_1}{\sqrt{2}}, \quad B_2 = -j \frac{A_1}{\sqrt{2}}. \quad (4)$$

Рассмотрим U-образный МПО (рис. 4б и 4в), в котором выполняется условие (4). Если считать, что длина изогнутых участков мала по сравнению с длиной прямоугольных участков, то устройству эквивалентно обычному МПО (см. рис. 4б).

Для реализации однонаправленного излучения ПАВ применим конструкцию, представленную на рис. 4в. Направленного излучения ПАВ можно добиться, расположив встречно-штыревой преобразователь (ВШП) между двумя плечами U-образного МПО [20]. Это позволит увеличить эффективность преобразования радиоимпульса опроса в ПАВ.

Если A — амплитуда волны, возбуждаемой ненаправленным ВШП в противоположные стороны, то амплитуды падающих на вводы 2 и 4 волн равны, но подвергаются разным фазовым задержкам, зависящим от положения преобразователя внутри U-образного МПО.

На рис. 4б представлена эквивалентная структура МПО. При этом амплитуды волн, выходящих из вводов 1 и 3, определяются выражениями

$$\begin{aligned} B_1 &= \frac{A}{\sqrt{2}} (\exp(-j\theta_1) - j \exp(-j\theta_2)), \\ B_3 &= \frac{A}{\sqrt{2}} (\exp(-j\theta_2) - j \exp(-j\theta_1)). \end{aligned} \quad (5)$$

Если выполняется условие $\theta_1 - \theta_2 = \pi/2$, то

$$B_1 = \exp(-j\theta_1) A \sqrt{2}, \quad B_3 = 0, \quad (6)$$

и таким образом достигается однонаправленное излучение.

Размещение отражательных структур (ОС) в одном акустическом канале, сформированном однонаправленным преобразователем, в случае их кодирования или коммутации приведет к перераспределению энергии и к увеличению неравномерности импульсов информационного сигнала. Для того чтобы исключить взаимное влияние ОС на формируемый кодированный сигнал, необходимо их располагать в соседнем акустическом канале. Условие полного переноса энергии, с учетом (1)–(3) будет выполнено при $x = L$, $\varphi = \pi/2$.

Здесь основной сложностью является тот факт, что апертура (ширина) второго акустического канала определена условием обеспечения необходимой информационной емкости. В этом случае для осуществления полной передачи энергии в соседний акустический канал, апертура которого отличается от апертуры исходного акустического канала, необходимо использовать асимметричный МПО [21] (рис. 5).

Вычислив L по (3), необходимо определить требуемое количество электродов:

$$N = L/p = 2L/\lambda, \quad (7)$$

где p – период.

Выражение для расчета эффективной длины взаимодействия эквивалентного канала апертуры W_2 :

$$L' = L \frac{W_1 + W_2}{2\sqrt{W_1 W_2}}. \quad (8)$$

На рис. 6 представлена структурная схема многопараметрического транспондера, состоящего из приемопередающей антенны, соединяемой ВЧ-кабелем с блоком датчиков, включающим многоканальную ПАВ-радиометку. Топология радиометки содержит многополосковые ответвители. Пороговые датчики подключены к ряду отражательных структур.

Для реализации многоканальной ПАВ-радиометки с улучшенными электрическими характеристиками применим в качестве входного элемента, преобразующего радиоимпульс в ПАВ, однонаправленный преобразователь, обеспечивающий максимальное излучение энергии в заданном на-

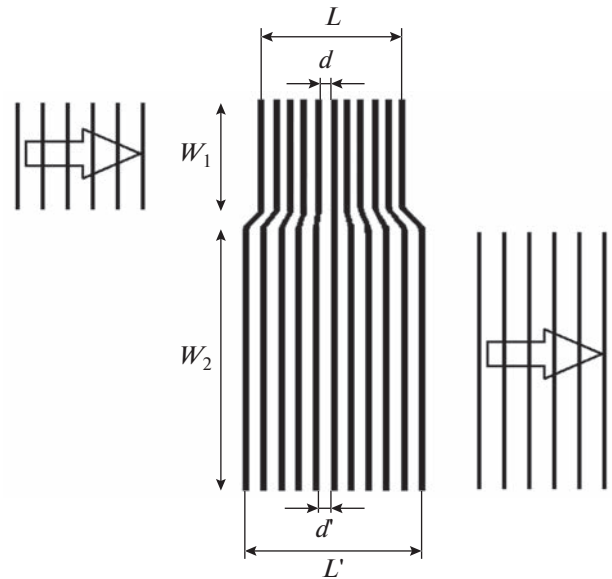


Рис. 5. Асимметричный МПО для полного переноса энергии.

правлении (см. рис. 4в). Расположив МПО с полным переносом энергии между входным преобразователем и отражательными структурами, обеспечиваем максимальное подавление импульсов двойного и последующих проходов. Апертура W_2 определяется требованиями к обеспечению необходимой информационной емкости радиометки, т.е. количеством ОС.

На рис. 7 представлены частотные характеристики применяемой в транспондере ПАВ-радиометки, которые показывают принцип подхода по уменьшению вносимых потерь в ее отклике. Из рис. 7а видно, что на входном преобразователе, включающем U-образный МПО, наблюдается максимальное однонаправленное излучение акустической энергии в широкой полосе частот в направлении ОС, а рис. 7б отображает, что каждая ОС максимально отражает поступающий акустический сигнал обратно в сторону преобразователя. Применяемый асимметричный МПО вносит дополнительные потери на полный перенос акустической энергии из одного канала в другой, составляющие не более 1 дБ во всей выбранной полосе частот.

Для исключения возможности попадания энергии поверхностных акустических волн, которые сформированы отражательными структурами, образующими смежные акустические каналы, на стадии проектирования радиометки обеспечивается пространственное разнесение этих структур с учетом дифракционной расходимости ПАВ [16]. Минимальное расстояние от входного преобразователя до ближайшей ОС определяется из условия обеспечения достоверной идентификации объекта.

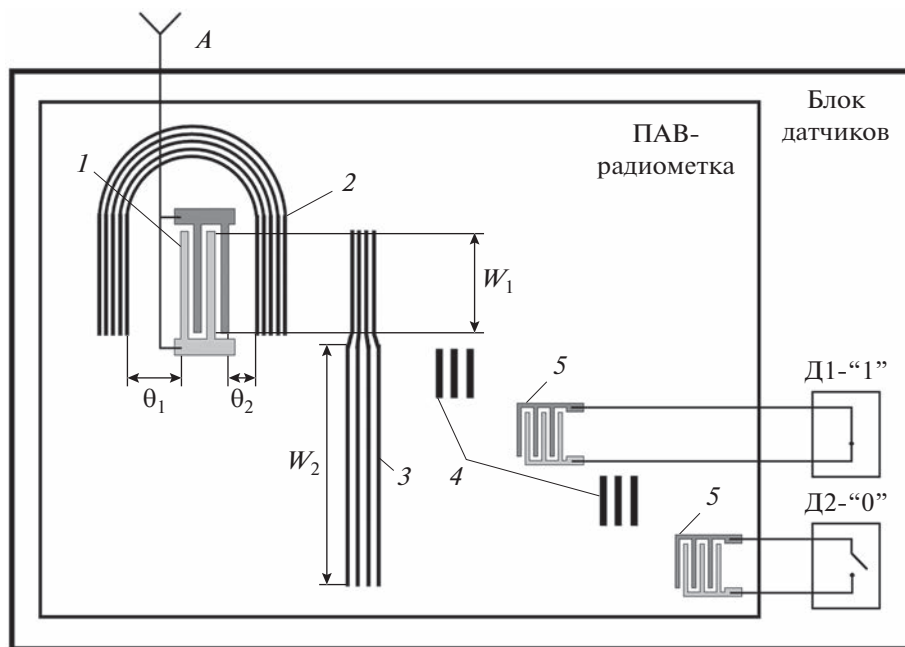


Рис. 6. Структурная схема многопараметрического транспондера на основе многоканальной ПАВ-радиометки, топология которой содержит МПО: А – приемопередающая антенна; 1 – входной ВШП; 2 – U-образный многополосковый ответвитель (МПО) с равным делением энергии; 3 – многополосковый ответвитель (компрессор); 4 – ОС, формирующие идентификационный код; 5 – ОС, выполненные в виде ВШП; Д – подключенные к ВШП 5 пороговые датчики, работающие по принципу ключа.

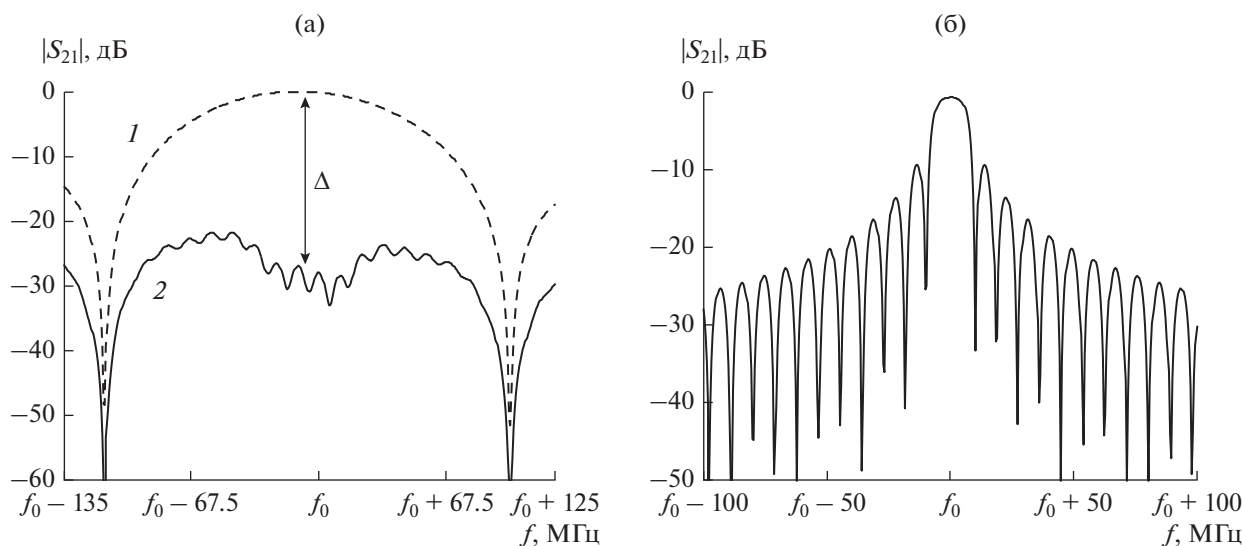


Рис. 7. Частотные характеристики элементов ПАВ-радиометки: а – нормированный коэффициент передачи входного преобразователя с U-образным МПО: 1 – в направлении расположения ОС; 2 – в направлении торца подложки; Δ – величина направленности излучения; б – коэффициент отражения ОС, формирующей информационный символ “1”.

Представленная конструкция [17, 22] позволяет полностью исключить электрическое взаимодействие между акустическими каналами, что существенно уменьшает степень взаимных искажений импульсов информационного сигнала. Динамический диапазон между идентификационными “0” и “1” составляет 25 дБ и позволяет обеспечить мак-

симальную различимость импульсов информационного сигнала при его дальнейшей обработке. Также к достоинствам предлагаемой конструкции относятся небольшие размеры пьезоэлектрической подложки, позволяющие обеспечивать компактность конечного изделия (блока датчиков многопараметрического транспондера).

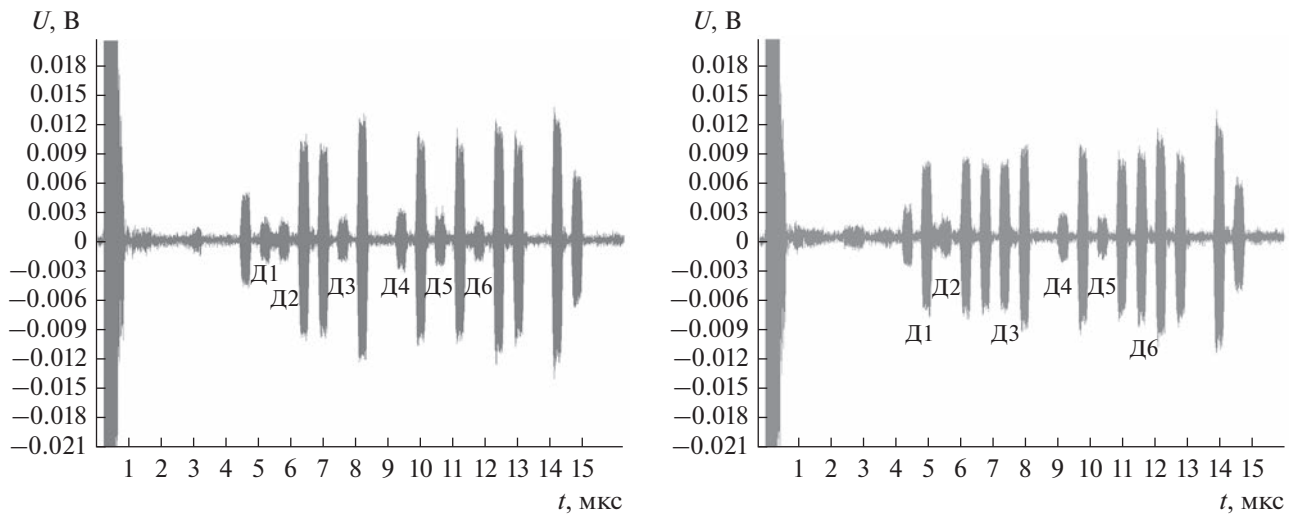


Рис. 8. Осциллограмма транспондера: а — до испытаний (все датчики в состоянии “0”); б — после испытаний (часть датчиков в состоянии “1”).

3. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОНДЕРА

Транспондер (см. рис. 6) использует энергию инициирующего радиоимпульса для формирования информационного кодированного сигнала с контролируемого объекта. Приемопередающая антенна транспондера A принимает короткий инициирующий радиоимпульс, передаваемый на входной ВШП I , который, вследствие обратного пьезоэффекта, генерирует ПАВ, распространяющиеся от него в противоположные стороны. При достижении ПАВ электродов U -образного МПО с учетом выполнения условия $\theta_1 - \theta_2 = \pi/2$ реализуется однонаправленное излучение ПАВ в акустическом канале апертуры W_1 , определяемой апертурой ВШП I с учетом дифракционной расходимости. Полная энергия ПАВ, излученная в одну сторону в акустическом канале апертуры W_1 , достигает многополоскового ответвителя (компрессора) $З$, обеспечивающего полный перенос акустической энергии, излученной входным преобразователем, из акустического канала апертуры W_1 в акустический канал апертуры W_2 , определяемой требованиями обеспечения информационной емкости радиометки (количества ОС). Достигнув ОС, акустическая энергия ПАВ в акустическом канале апертуры W_2 делится на N каналов, число которых соответствует количеству ОС, формирующих информационный сигнал. Отраженные волны, сформированные в свою очередь ОС, возвращаются с определенными временными задержками на компрессор, где их энергия переносится в акустический канал апертуры W_1 и далее приходит на входной ВШП I , в котором преобразуется в информационную посылку, включающую импульсы, отвечающие за идентификационные данные объекта,

и импульсы, отвечающие за коммутацию сигналов с датчиков контроля физических воздействий.

Все отражательные структуры ЛЗ могут быть выполнены в виде ВШП для возможности осуществления внешней регулировки амплитуд импульсов информационного сигнала посредством подключения к ним пороговых датчиков физических величин, работающих по принципу ключа (см. рис. 6). Коэффициент отражения от ОС, нагруженных датчиками, рассчитывается так, чтобы при замыкании/размыкании контактной группы датчика эффективность отражения ПАВ от соответствующего ВШП достигала максимального/минимального значения. Причем коэффициент отражения должен быть рассчитан для двух случаев: при замкнутой контактной группе (датчик Д1, см. рис. 6, проводимость датчика имеет индуктивный характер) и при разомкнутой (датчик Д2, проводимость датчика имеет емкостной характер). Таким образом, можно управлять коэффициентом акустического отражения, изменяя амплитуды соответствующих импульсов до минимального или максимального значения, по которому можно сделать выводы о состоянии охраняемого объекта. При воздействии предельных нагрузок контактная группа датчика замыкает (или размыкает) соответствующий ВШП, вследствие чего изменяется коэффициент акустического отражения ПАВ до минимального (или максимального) значения, что приводит к изменению кодированной последовательности импульсов информационного сигнала радиометки транспондера.

На рис. 8а представлен кодированный информационный сигнал, сформированный ПАВ-радиометкой транспондера до воздействия предельных значений физических факторов. В исходном состоянии амплитуды импульсов, отвечающих за

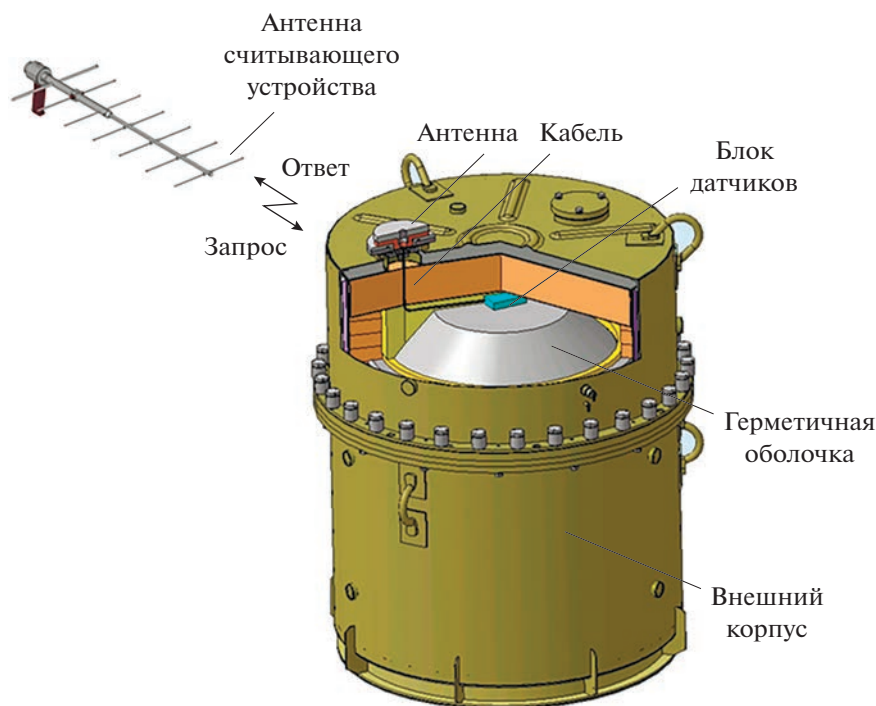


Рис. 9. Схема установки модульного исполнения транспондера в ЗК.

определенное воздействие на объект (Д1...Д6), соответствуют логическому "0".

На рис. 8б представлен информационный сигнал транспондера, прошедшего в полном объеме государственные испытания в составе ЗК, подтвердившие соответствие его прочностных характеристик требованиям нормативных документов МАГАТЭ и Ростехнадзора [1, 23], зарегистрировавшего факты воздействия предельных величин контролируемых параметров. При превышении заданной величины физического воздействия амплитуда соответствующего импульса изменяет свое значение до максимального уровня, что соответствует логической "1" (Д1, Д3, Д6). Реальные значения воздействующих физических нагрузок регистрировались пьезоакселерометрами.

В ходе испытаний установлено, что многопараметрический транспондер обладает следующими характеристиками прочности: к ударным воздействиям с пиковым значением перегрузки свыше 2000g; к температурному воздействию 800°C в течение 30 мин на антенну транспондера, расположенную на внешней части ЗК; к атмосферной влажности воздуха 98% при температуре 25°C. Транспондер устойчив к воздействию ионизирующих излучений при суммарной поглощенной дозе до 700 Гр [1, 23].

В транспондере на основе многоканальной ПАВ-радиометки максимальное количество контролируемых параметров (число устанавливае-

мых датчиков контроля) равно числу ОС, выполненных в виде ВШП. Кроме того, кодирование информационного сигнала можно осуществлять как топологическим способом, т.е. включением или исключением отражательной структуры из топологии ПАВ-радиометки, так и шунтированием отражательных ВШП, уменьшая амплитуду соответствующего импульса до минимального значения. Если эксплуатация транспондера предполагается в нормальных условиях, то для увеличения информационной емкости можно использовать времяпозиционное или фазовое кодирование [24].

4. ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМЫХ ТРАНСПОНДЕРОВ

Предлагаемая система может работать в диапазоне частот 380...480 МГц, что обусловлено техническими характеристиками применяемой элементной базы в блоках приема и передачи информации считывателя. Предельная мощность излучаемого считывателем сигнала составляет 16 Вт, что обеспечивает правильную идентификацию транспондера и достоверную регистрацию состояний датчиков контроля на дистанции до 18 м с вероятностью 0.95. Передающий блок генерирует импульсы опроса на выбранной из указанного диапазона частоте f_0 , причем за единичный опрос передается периодическая последовательность импульсных сигналов.

Длительность импульса опроса должна обеспечивать энергетическое накопление содержащих закодированную информацию откликов транспондера и в нашем случае должна быть не менее 0.5 мкс, при этом временные характеристики ответных импульсов идентичны импульсу опроса.

Топология ПАВ-радиометки выбирается исходя из условия обеспечения скважности сигнала транспондера, равной 1, с учетом требования различимости импульсов данного сигнала при работе приемопередающего блока считывателя со скважностью 2. Максимальное количество контролируемых объектов определяется количеством ОС (разрядов), т.е. 2^n . ПАВ-радиометка представленного многопараметрического транспондера может содержать 18 ОС, шесть из которых отвечают за контроль различных параметров, таким образом, информационная емкость составляет 4096 идентифицируемых единиц.

Каждый контейнер [25] оснащается транспондером, который может быть выполнен в виде как внешнего устройства, так и в модульном варианте. Идентификационный код транспондера соответствует идентификационному номеру устанавливаемой в его корпус ПАВ-радиометки, при этом изменение кодированной последовательности импульсов радиометки невозможно.

Модульное исполнение транспондера предполагает установку антенны, устойчивой к различным внешним дестабилизирующим воздействиям, на внешней части контейнера. В данном случае она соединяется посредством кабеля с блоком датчиков, включающим ПАВ-радиометку с подключенными датчиками физических воздействий (рис. 9). При реализации данной схемы блок датчиков устанавливается внутри контейнера в зоне особого контроля физических параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показана методология организации мониторинга защитных контейнеров с опасными веществами для осуществления постоянного контроля состояния упакованного потенциально опасного груза защитного контейнера без его вскрытия. Система позволяет решить задачу обеспечения безопасности обслуживающего персонала во всем цикле обращения с ЗК при транспортировании и хранении потенциально опасного груза и снизить возможный ущерб, наносимый авариями. Реализованная схема построения транспондера исключает вероятность искажения информационных данных. Эксплуатация представленной системы возможна на любых предприятиях и производствах, применяющих в своих изделиях опасные вещества.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов. НП-053-16. Официальное издание. М.: ФБУ "НТЦ ЯРБ", 2017.
2. Аристархов Г.М., Гуляев Ю.В., Дмитриев В.Ф. и др. Фильтрация и спектральный анализ радиосигналов. Алгоритмы. Структуры. Устройства / Под ред. Ю.В. Гуляева. М.: Радиотехника, 2020.
3. Гуляев Ю.В., Сучков С.Г., Янкин С.С. и др. // РЭ. 2015. Т. 60. № 4. С. 429.
4. Дмитриев В.Ф., Койгеров А.С. // РЭ. 2011. Т. 56. № 10. С. 1268.
5. Крышталъ Р.Г., Кундин А.П., Медведь А.В. // РЭ. 2016. Т. 61. № 4. С. 825.
6. Киселев В.К., Князев И.А., Никулин С.М., Труфанова Г.В. // Датчики и системы. 2003. № 10. С. 8.
7. Анцев И.Г., Богословский С.В., Сапожников Г.А. и др. // Датчики и системы. 2018. № 1. С. 40.
8. Smirnov D., Plessky V., Mishkinis R. et al. // Proc. 2020 IEEE Int. Ultrasonic Symp. (IUS). Las Vegas. 7–11 Sept. N.Y. IEEE, 2020. P. 9251703. <https://doi.org/10.1109/IUS467667.2020.9251703>.
9. Mengue P., Paulmier B., Hage-Ali. S. et al. // Proc. 2021 IEEE Conf. SENSORS. Sydney. 31 Oct–04 Nov. N.Y.: IEEE, 2021. P. 9639571. <https://doi.org/10.1109/SENSORS47087.2021.9639571>.
10. Zhou X., Tan Q., Liang X. et al. // Micromachines. 2021. V. 12. P. 643. <https://doi.org/10.3390/mi12060643>
11. Дорохов С.П. // Датчики и системы. 2018. № 11. С. 35.
12. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Сов. радио, 1966.
13. Заездный А.М. Основы расчетов по статистической радиотехнике. М.: Связь, 1969.
14. ГОСТ 12.1.006-84. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля (с Изменением № 1). Дата введения 01.01.1986. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002.
15. Бартон Д. Радиолокационные системы. М.: Воениздат, 1967.
16. Дорохов С.П., Козлов В.А., Салов А.С. // Проектирование и технология электронных средств. 2017. № 2. С. 22.
17. Реут В.Р., Койгеров А.С., Андрейчев С.С. и др. // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21. № 10. С. 579.
18. Morgan D. Surface Acoustic Wave Filters with Applications to Electronic Communications and Signal Processing. L.: Acad. Press, 2007.

19. Олинер А., Фарнелл Дж., Джерард Г. и др. Поверхностные акустические волны // Под ред. А. Олинера. М.: Мир, 1981.
20. Marshall F.G., Paige E.G., Young A.S. // Electronics Lett. 1971. V. 7. P. 638.
21. Maerfeld C., Farnell G.W. // Electronics Lett. 1973. V. 9. P. 432.
22. Андрейчев С.С., Дорохов С.П., Койгеров А.С. и др. Радиометка на основе линии задержки на поверхностных акустических волнах // Пат. РФ № 2 701 100. Оpubл. офиц. бюл. “Изобретения. Полезные модели” № 27 от 24.09.2019.
23. Regulations for the safe transport of radioactive material. 2018 Ed. Specific safety requirements No. SSR-6 (Rev. 1). IAEA, Vienna: Int. Atomic Energy Agency, 2018. P. 170.
24. Бальшева О.Л., Григорьевский В.И., Гуляев Ю.В. и др. Акустоэлектронные устройства обработки и генерации сигналов. Принципы работы, расчета и проектирования / Под ред. Ю.В. Гуляева. М.: Радиотехника, 2012.
25. Салов А.С., Дорохов С.П., Тагиров Р.М. и др. Контейнер со средствами защиты и контроля // Пат. РФ № 2 715 379. Оpubл. офиц. бюл. “Изобретения. Полезные модели” № 6 от 27.02.2020.