

# СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТОВ С РАДИОАКТИВНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ, НАХОДЯЩИМИСЯ НА ДЛИТЕЛЬНОМ ХРАНЕНИИ

*С. П. Дорохов, А. С. Салов, В. И. Юферев<sup>1</sup>*

ФГУП ФНПЦ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Н. Новгород

<sup>1</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Одним из важных аспектов борьбы с несанкционированным использованием радиоактивных материалов является организация их мониторинга в процессе длительного хранения, основной задачей которого является контроль сохранности и состояния содержимого в контейнере.

Бесконтактный мониторинг объектов особенно актуален в тех случаях, когда важны не только оперативность и высокая производительность процессов идентификации и контроля состояния объекта, но и обеспечение безопасности персонала. К таким опасным объектам относятся, прежде всего, контейнеры, содержащие взрывчатые и радиоактивные вещества.

В настоящее время одной из проблем при эксплуатации больших хранилищ делящихся материалов со стеллажным принципом размещения упаковок является значительная продолжительность процесса инвентаризации, в результате чего персоналу приходится длительное время находиться в условиях радиационного облучения. На сегодняшний день процесс инвентаризации осуществляется персоналом визуальной проверкой наличия пломб и считыванию штрих кода, нанесенного на внешнюю поверхность контейнера. Так должен быть осмотрен каждый контейнер и сопоставлены реальные данные о его целостности с учётными данными (состояние пломбирования, номер контейнера, местоположение и др.). Одним из решений этой проблемы является автоматизация процесса инвентаризации с целью исключения участия персонала в этом процессе.

Перспективным направлением создания систем мониторинга является разработка бесконтактных систем, в которых вся необходимая информация об объекте считывается дистанционно со специальной «метки», установленной на каждом объекте.

В данной работе рассматривается способ автоматизации процесса инвентаризации ядерных материалов в долговременных хранилищах на основе транспондерных систем. Техническая реализация автоматизированной системы инвентаризации для контейнеров с использованием энергонезависимых транспондеров на основе многоканальных отражательных линий задержки (ОЛЗ) на поверхностных акустических волнах (ПАВ).

В настоящее время в НИИ измерительных систем реализован опытный образец радиочастотной

системы идентификации, контроля и учета объектов с ЯМ в процессе длительного хранения, успешно прошедший государственные испытания. Основным преимуществом данной системы является возможность дистанционного съема информации.

## Идеология использования транспондерных систем

Процесс инвентаризации ядерных материалов заключается в периодическом обследовании всех контейнеров, находящихся в хранилище, и получение актуальной на момент проверки информации о состоянии контейнера, в первую очередь о:

- фактическом наличии контейнеров в хранилище;
- нахождении контейнеров на своих местах;
- целостности системы пломбирования, свидетельствующей об отсутствии вскрытия контейнеров.

Полученная при обследовании фактическая информация сопоставляется с учётными данными о контейнерах. По результатам сопоставления фактических и учётных данных делается вывод об отсутствии аномалий в процессе хранения ядерных материалов.

Идея автоматизации процесса инвентаризации заключается в том, чтобы каждый контейнер снабдить пассивным устройством (транспондером), содержащим информацию о номере контейнера, целостности системы пломбирования, данные о местоположении контейнера в хранилище и периодически в автоматическом режиме с помощью специального считывающего устройства без участия персонала опрашивать контейнеры, получая информацию о состоянии каждого контейнера. Полученная информация с помощью компьютерных технологий в диспетчерском пункте сравнивается с базой учётных данных по результатам чего делается вывод об отсутствии или наличии аномалий в хранении.

Принципиальная схема автоматизированной системы инвентаризации представлена на рис. 1.

Важным моментом является то, что на контейнеры устанавливаются пассивные элементы – транспондеры, не содержащие источников питания и не требующие обслуживания.

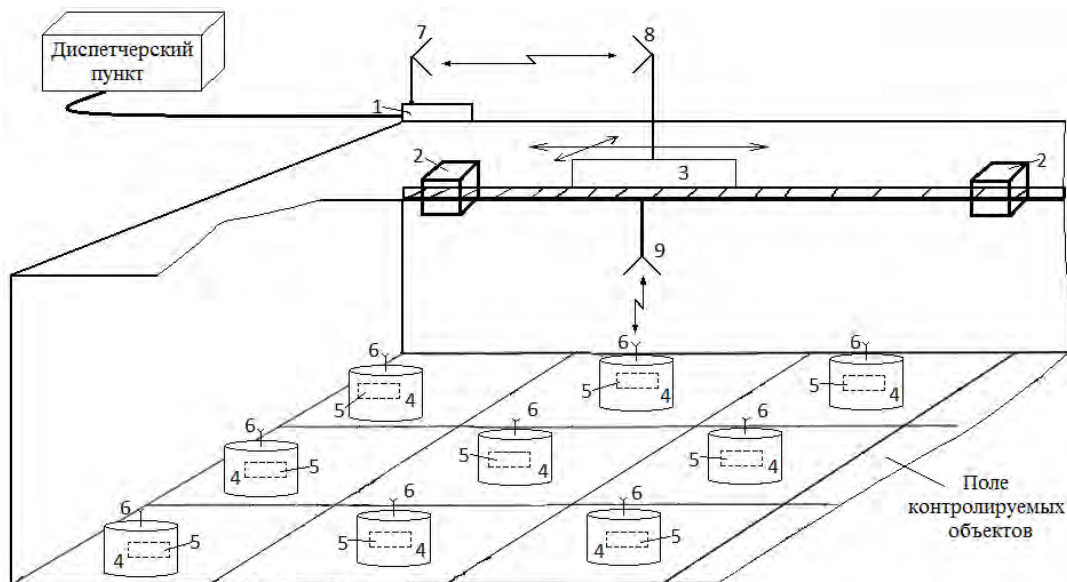


Рис. 1. Принципиальная схема автоматизированной системы инвентаризации: 1 – ретранслятор, подключённый к диспетчерскому пункту (центру обработки информации); 2 – автоматизированный механизм перемещения считывателя; 3 – считыватель информации с транспондеров; 4 – контейнеры; 5 – транспондеры; 6–9 – антенны

### Принцип работы системы

Система состоит из двух функционально самостоятельных частей: базовой станции (БС) и транспондера (ТП) (рис. 2). Транспондер устанавливается на контролируемый объект (контейнер) и является радиационностойким элементом, позволяющим проводить идентификацию объекта и работающим без элементов питания [1]. В него входят энергонезависимые датчики, позволяющие регистрировать факты несанкционированных воздействий с момента установки системы на предприятии изготовителе, при его транспортировке и дальнейшем хранении.



Рис. 2. Структурная схема системы дистанционной идентификации и контроля

При работе системы приемно-передающий 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 состояние его датчиков.

Ключевым элементом транспондера, формирующим паспортный код и отслеживающим состояние объекта, является отражательная линия задержки (ОЛЗ) на поверхностных акустических волнах (ПАВ). В связи с тем, что транспондер подвергается

длительному ионизирующему излучению, ОЛЗ выполнена на пьезоэлектрической подложке из  $\text{LiNbO}_3$ . Проведенные исследования и испытания показали, что данный материал наиболее устойчив в условиях повышенного радиационного фона [2]. Кроме того, ниобат лития широко распространен, обладает высоким коэффициентом электро-механической связи и низким коэффициентом затухания ПАВ.

### Принцип работы и описание конструкции ОЛЗ на ПАВ

Работа ОЛЗ основывается на возбуждении ПАВ встречно-штыревыми преобразователями (ВШП) при подаче на него активирующего радиопульса опроса, прохождении ПАВ по акустическому каналу и последующем преобразовании энергии, отраженной ПАВ, в информационный сигнал.

Для уменьшения влияния переотражений в акустическом канале должно находиться минимальное количество рефлекторов, таким образом, оптимального результата можно добиться, расположив в каждом из акустических каналов по 3 элемента: 2 из которых являются отражательными элементами, формирующими информационный сигнал, и 1 входной/выходной элемент, преобразующий электромагнитный сигнал в акустическую волну и обратно. Преимуществом такой конструкции является возможность пространственного разнесения акустических каналов, обеспечивающих пониженный уровень ложных импульсов при формировании информационного сигнала с высоким коэффициентом отражения от каждой отражательной структуры.

Входные преобразователи в ОЛЗ соединены между собой и выполнены в виде ВШП. Все отражательные элементы ОЛЗ также выполнены в виде встречно-штыревых преобразователей для возможности осуществления внешней регулировки амплитуд импульсов информационного сигнала [3]. Регулировка амплитуд отраженных импульсов необходима для уменьшения неравномерности импульсов информационного сигнала, что упрощает его обработку. Коэффициент металлизации отражательных элементов подбирается так, чтобы при замыкании ВШП эффективность отражения ПАВ от него была минимальна. Таким образом, выполнение рефлекторов в виде ВШП позволяет управлять импульсами информационного сигнала с помощью внешней электрической нагрузки, при этом, соответственно, можно менять код, формируемый ОЛЗ.

В предлагаемой конструкции все отражательные элементы расположены относительно друг друга на одной линии и имеют одинаковые расстояния до края пьезоэлектрической подложки. Такое расположение рефлекторов значительно повышает технологичность монтажных операций при разварке перемычек с контактных площадок на выводы корпуса, в который устанавливается ОЛЗ.

Структурная схема многоканальной отражательной линии задержки представлена на рис. 3.

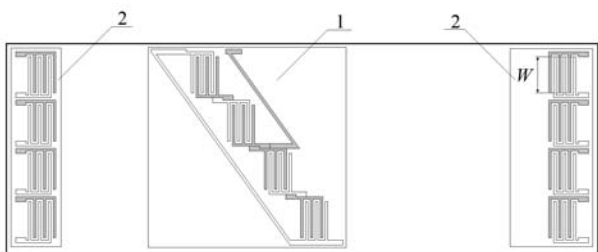


Рис. 3. Структурная схема многоканальной ОЛЗ: 1 – входной/выходной преобразователь, 2 – отражательные элементы,  $W$  – апертура отражательного элемента

При необходимости формирования информационного сигнала большой емкости увеличивается число акустических каналов, определяемых количеством ВШП, образующих общую конструкцию. Таким образом, основная сложность данной конструкции заключается в согласовании входного/выходного преобразователя с внешним волновым трактом.

### Согласование входного преобразователя

Из [4] известно, что на центральной частоте активная составляющая сопротивления излучения имеет вид:

$$R_a(\omega_c) \approx \frac{G_a(\omega_c)}{(\omega_c C_t)^2}, \quad (2)$$

где  $G_a(\omega_c)$  – активная составляющая проводимости излучения,  $\omega_c$  – центральная частота,  $C_t$  – статическая емкость единичного ВШП.

Статическая емкость единичного ВШП вычисляется по формуле [5]:

$$C_t = WN_p(\varepsilon_0 + \varepsilon_p) \frac{K(k_2)}{K(k_2')}, \quad (3)$$

где  $W$  – апертура ВШП;  $N_p$  – число пар электродов;  $K(k_2)$  – полный эллиптический интеграл первого рода;  $k_2 = \sin\left(\frac{\pi d}{2h}\right)$ ,  $h$  – период решетки;  $d$  – ширина электродов,  $k_2' = \sqrt{1 - k_2^2}$ ,

$$\varepsilon_p = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{11}^T \varepsilon_{33}^T - (\varepsilon_{13}^T)^2}}{\varepsilon_0}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_{11}^T$ ,  $\varepsilon_{33}^T$ ,  $\varepsilon_{13}^T$  – компоненты матрицы диэлектрической проницаемости подложки.

Как было показано в работе [6], для уменьшения дифракционных потерь при распространении ПАВ апертура  $W$  единичных ВШП входного преобразователя должна удовлетворять условию:

$$W > \sqrt{\lambda x |1 + \gamma|}, \quad (5)$$

где  $\lambda$  – длина ПАВ,  $x$  – расстояние от ВШП входного преобразователя до самого дальнего отражательного элемента,  $\gamma$  – параметр анизотропии.

В монографии [7] активную составляющую сопротивления излучения эквидистантного неаподизованного ВШП на центральной частоте предлагается рассчитывать по формуле:

$$G_a(\omega_c) = \frac{8}{\pi} k^2 f_0 C_t N_p, \quad (6)$$

где  $k^2$  – коэффициент электро-механической связи,  $f_0$  – частота акустического синхронизма.

Таким образом, значение величины  $R_a(\omega_c)$  может быть скорректировано схемой включения единичных ВШП входного преобразователя, подбором их оптимальной апертуры  $W$  и количества пар электродов, что позволит получить необходимое значение входного импеданса ОЛЗ для осуществления хорошего согласования ее входного преобразователя с внешним волновым трактом.

В конструкции, представленной на рис. 3, оптимального результата можно добиться, используя последовательно-параллельное подключение единичных ВШП входного преобразователя между собой [8].

На рис. 4, 5 представлены осциллограммы информационных сигналов с параллельным подключением единичных ВШП входного преобразователя и последовательно-параллельным соответственно, из которых видно, что при последовательно-параллельном подключении удалось снизить затухание амплитуд импульсов информационного сигнала на  $\sim 3$  дБ (по напряжению), при этом получив равномерность импульсов информационного сигнала, не превышающую 5 дБ (по напряжению).

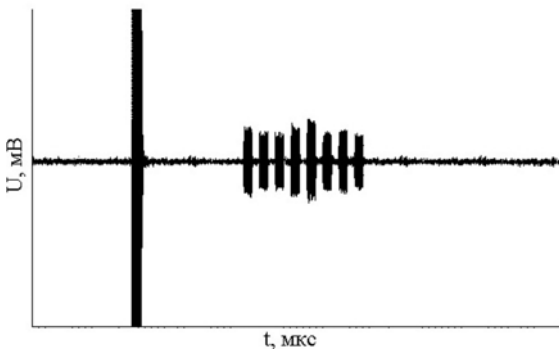


Рис. 4. Параллельное подключение

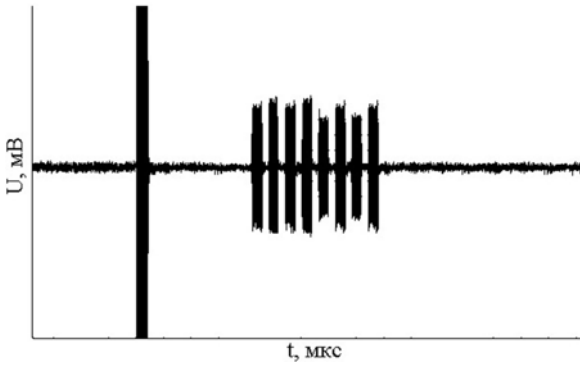


Рис. 5. Последовательно-параллельное подключение

Выполнение шин подключения входного преобразователя с наклоном позволяет часть энергии ПАВ, отраженной от них при ее прохождении по акустическому каналу, отклонить от направления распространения чистой моды (совпадающего с кристаллографической осью пьезоэлектрической подложки), исключая, таким образом, дополнительные паразитные переотражения ПАВ.

Транспондер использует энергию инициирующего радиоимпульса для формирования информационного кодированного сигнала с контролируемого объекта. Приемопередающая антенна транспондера принимает короткий инициирующий радиоимпульс, который по коаксиальному кабелю передается на входной/ преобразователь ОЛЗ, преобразующий его в поверхностную акустическую волну, распространяющуюся от него в обе стороны, каждая в своем акустическом канале. ПАВ, достигнув отражательных элементов отражается от них и достигает входного/выходного преобразователя, который преобразует ее в ответный радиоимпульс, содержащий информационную посылку, включающую в себя идентификационный номер охраняемого объекта и информацию о состоянии пороговых или аналоговых датчиков. Пороговые или аналоговые датчики могут размещаться внутри охраняемого объекта, в местах воздействия критических нагрузок или в местах особого контроля изменений физических параметров и находиться как внутри корпуса транспондера, так и вне его. При срабатывании датчика происходит замыкание (или размыкание) соответствующего отражательного элемента, вследствие чего изменяется коэффициент отражения ПАВ до минимального (или максимального) значения, тем самым изменяются амплитуды импульсов, по изменению которых можно сделать выводы о состоянии охраняемого объекта.

На рис. 6 приведена схема построения транспондера на основе многоканальной ОЛЗ на ПАВ. При реализации данной конструкции существует возможность согласования входного преобразователя ОЛЗ с приемо-передающей антенной изменением длины коаксиального кабеля.

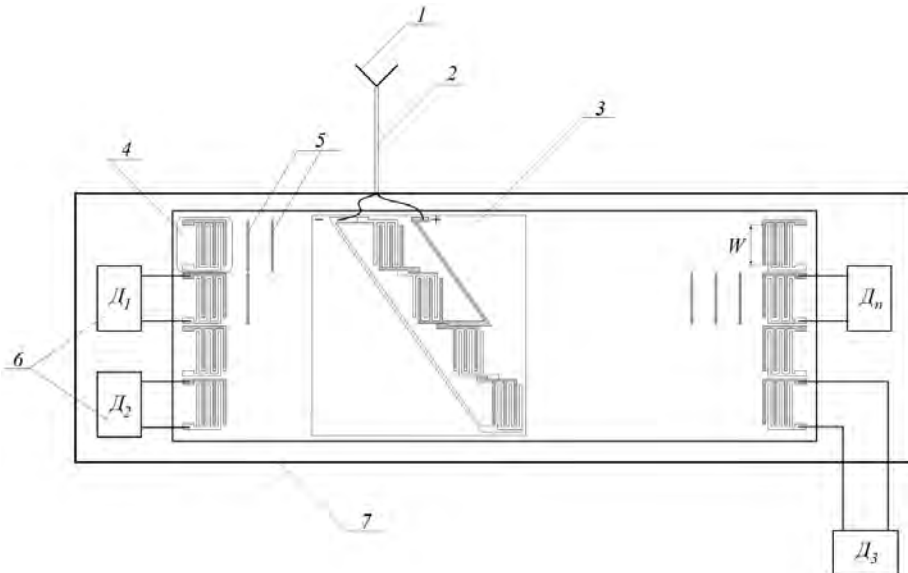


Рис. 6. Схема реализации транспондера на основе многоканальной ОЛЗ на ПАВ: 1 – приемопередающая антенна; 2 – коаксиальный кабель, соединяющий приемопередающую антенну с входным/выходным преобразователем многоканальной ОЛЗ; 3 – входной/выходной преобразователь многоканальной ОЛЗ; 4 – отражательные элементы, выполненные в виде ВШП; 5 – отражательные рефлекторы; 6 – пороговые или аналоговые датчики, подключаемые к выводам ВШП; 7 – корпус транспондера,  $W$  – апертюра ВШП

В транспондере на основе многоканальной ОЛЗ на ПАВ максимальное количество контролируемых параметров (число устанавливаемых датчиков контроля) равно удвоенному числу единичных ВШП, образующих входной/выходной преобразователь. Кроме того, информационную емкость транспондера можно увеличить, располагая перед отражательными элементами, выполненными в виде ВШП, дополнительных отражательных рефлекторов, а кодирование информационного сигнала можно осуществлять как топологическим способом, т. е. включением или исключением отражательного рефлектора из топологии многоканальной ОЛЗ на ПАВ, так и шунтированием отражательных элементов. Если эксплуатация транспондера предполагается в нормальных условиях, для увеличения информационной емкости до  $4^n$  можно использовать время-позиционное кодирование.

На рис. 7 представлен кодированный информационный сигнал, сформированный многоканальной ОЛЗ на ПАВ. Импульсы № 2, № 15 отвечают за превышение предельного порогового значения физического воздействия на охраняемый объект и попытки несанкционированного вскрытия контейнера (амплитуды импульсов № 2, № 15 соответствуют логическому «0»).

На рис. 8 представлен информационный сигнал транспондера, зарегистрировавшего факт воздействия предельных величин контролируемых параметров (амплитуды импульсов №2, №15 соответствуют логической «1»).

В результате использования предлагаемых технических решений при создании энергонезависимого транспондера на основе многоканальной ОЛЗ на ПАВ можно добиться дальности идентификации, превышающей 15 м.

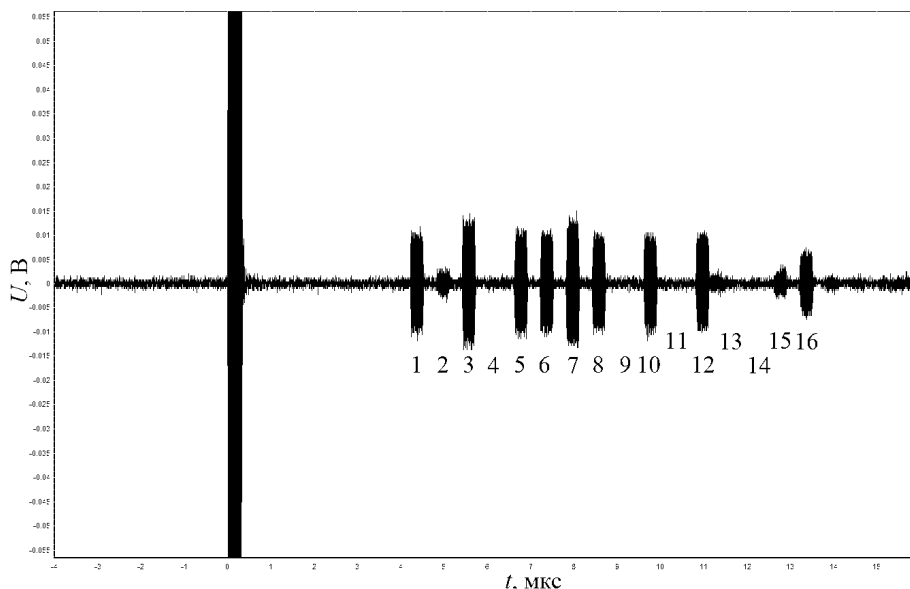


Рис. 7. Кодированный информационный сигнал, сформированный ОЛЗ на ПАВ

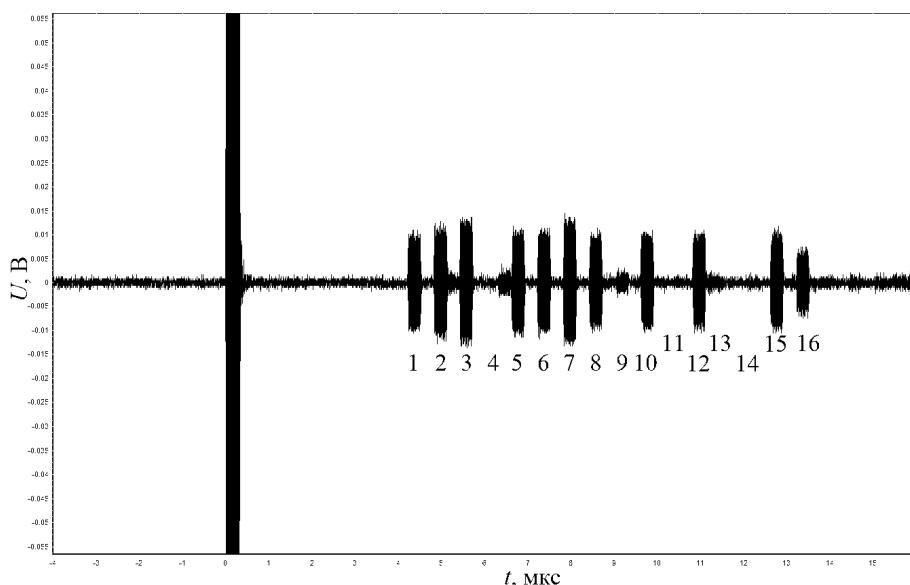


Рис. 8. Информационный сигнал транспондера, сформированный ОЛЗ на ПАВ

## Техническая реализация системы контроля объектов

Каждый контейнер оснащается транспондером (рис. 9), который устанавливается на крышке двумя болтами, аналогичными используемым. Корпус транспондера изготовлен таким образом, что при попытке несанкционированного вскрытия (выкручивании болта крепления крышки контейнера), происходит срабатывание датчика, находящегося в транспондере, и изменяется закодированная последовательность импульсов информационного сигнала транспондера.



Рис. 9. Транспондер системы контроля объектов в хранилищах.

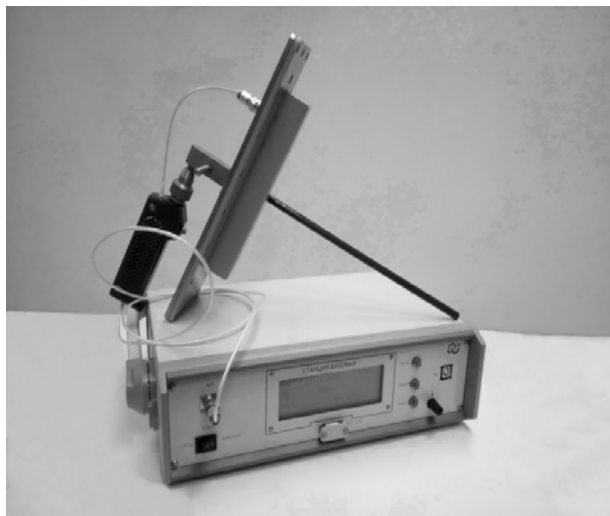


Рис. 10. Базовая станция с антенной

Базовая станция с антенной (рис. 10) может перемещаться как вручную (обслуживающим персоналом), так и с помощью имеющейся кран-балки хранилища (рис. 1). При прохождении над полем контейнеров базовая станция производит опрос каждого

транспондера и передает полученные данные в диспетчерский пункт. На рис. 6 представлен стеллаж с контейнерами, оснащенными транспондерами системы контроля объектов в хранилищах. При данной организации хранилища контроль осуществляется в автоматическом режиме, либо производится вручную оператором. Опрос осуществляется путем совмещения диаграмм направленности антенны БС с антенной транспондера [9].

При опросе базовой станцией происходит обработка и дешифровка приходящих с транспондера кодированных последовательностей импульсов и информация о состоянии объекта. Результат выдается на систему отображения информации, при этом базовая станция одновременно запоминает полученные данные и передает в компьютер на диспетчерский пункт.

## Выводы

Особенностью разработанной системы является универсальность, так как систему можно использовать во всем цикле обращения с контейнерами: от установки на предприятии изготовителе, при транспортировке и в дальнейшей эксплуатации в хранилище.

Основными преимуществами данной системы являются:

- дистанционный контроль состояния объектов;
- энергонезависимость транспондера;
- возможность контроля нескольких параметров состояния объекта при его транспортировке и хранении;
- прочность к ионизирующему излучению;
- снижение влияния ионизирующего излучения на обслуживающий персонал.

## Литература

1. Дшхунян В. Л., Шаньгин В. Ф. Электронная идентификация. М.: НТ Пресс, 2004. С. 695.
2. Дорохов С. П., Салов А. С. Результаты экспериментального исследования влияния ионизирующего излучения на отражательные линии задержки на поверхностных акустических волнах // X Межотраслевая конференция по радиационной стойкости: Сборник докладов. 2014. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». С. 445–450.
3. Пат. 2522886 РФ, МПК H03H 9/00, G01S 13/00. Многоканальная отражательная линия задержки на поверхностных акустических волнах / И. А. Князев, А. С. Салов, С. П. Дорохов // Изобретения. Полезные модели. 2014. № 20.
4. Морган Д. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах. – М: Радио и связь, 1990. С. 416.
5. Дорохов С. П., Козлов В. А., Салов А. С. Затухание информационного сигнала многоканальной ОЛЗ на ПАВ // XIII Международная научно-техни-

ческая конференция «Информационные системы и технологии» ИСТ-2017: Материалы конференции. 2017. Н. Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексева. С. 1277–1280.

6. Дорохов С. П., Козлов В. А. Влияние анизотропии кристалла  $\text{LiNbO}_3$  на изменение фазовой скорости ПАВ // Физика и технические приложения волновых процессов: Тезисы докладов XIV Международной научно-технической конференции: приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы». 2016. Казань: ООО «16ПРИНТ». С. 123–125.

7. Балышева О. Л., Григорьевский В. И., Гуляев Ю. В., Дмитриев В. Ф., Мансфельд Г. Д. Акусто-

электронные устройства обработки и генерации сигналов. Принципы работы, расчета и проектирования. – М.: Радиотехника, 2012. С. 576.

8. Пат. 2610415 РФ, МПК H03H 9/30. Многоканальная отражательная линия задержки / С. П. Дорохов, А. С. Салов // Изобретения. Полезные модели. 2017. № 4.

9. Пат. 2495489 РФ, МПК G06R 7/00, G08B 25/10. Автоматизированная система дистанционного контроля объектов в стационарных хранилищах / В. Ю. Вережанский, И. А. Князев, О. Н. Костюкевич, В. И. Юферев // Изобретения. Полезные модели. 2013. № 28.