

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.11>

УДК: 534.213.4:517.518.82

## ПРИЁМО-ПЕРЕДАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КАНАЛА СВЯЗИ ЗАБОЙ-УСТЬЕ

О.В. Стукач<sup>1,2</sup>, И.А. Ершов<sup>2</sup>, С.В. Быков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет  
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, д. 20

Статья поступила в редакцию 26 октября 2023 г.

**Аннотация.** Разработан ультразвуковой приёмопередатчик на базе PIC18F2455 для радиофизических исследований внутритрубного пространства скважины как акустического канала обмена телеметрической информацией. Излучателями и приёмниками являются комбинированные пьезоэлементы TR60-10H0Z-01. Рабочая частота – 60 кГц, кодирование сигнала проводится по протоколу «Манчестер-II». Выбранные пьезоэлементы позволяют повысить размах сигнала от пика до пика до 140 В. Представлены и подробно описаны принципиальные электрические схемы передатчика и приёмника. Поскольку первичные источники питания отсутствуют, предусмотрена работа от аккумуляторов с напряжением 12 В. Сигнал на пьезоизлучатель поступает с трансформатора, к которому подключены два ключевых транзистора, открываемых по очереди. Разработанная система была протестирована на испытательном стенде, представляющем собой трубу, наполненную водой. Показано, что использование внутритрубного пространства, заполненного песчано-глинистой смесью с большим содержанием воды, позволяет снизить затухание акустического сигнала и уменьшить влияние неоднородности среды.

**Ключевые слова:** измерения в процессе бурения, ультразвуковой канал, геофизическая телеметрия, кодирование сигнала.

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 22-29-00024.

**Автор для переписки:** Ершов Иван Анатольевич, [ershov@corp.nstu.ru](mailto:ershov@corp.nstu.ru)

## Введение

В процессе бурения нефтяных и газовых скважин для контроля их положения и получения геофизической информации используются телеметрические системы. Недостатки гидравлического, электропроводного и электромагнитного каналов связи забой-устье заставляют продолжать исследования акустического канала и способов передачи данных через него.

Главным преимуществом акустического канала связи является высокая скорость передачи данных. Разработанная в статье [1] система позволяет обеспечить скорость передачи 64 бит/с на расстоянии 1,95 км, что превышает скорость используемых на данный момент гидроимпульсных и электромагнитных каналов связи. Проблемой акустического канала является ограничение дальности передачи из-за сильного затухания и высокого уровня шума. Обычно для решения данной проблемы используются ретрансляторы. Конкурентным преимуществом представленного технического решения является отсутствие ретранслятора, что позволяет значительно снизить затраты на внедрение и использование системы связи. Этого удалось достичь благодаря использованию двух несущих частот в сочетании с синхронным усилителем. Синхронный усилитель необходим для выделения из шума полезного сигнала [2-3].

При использовании акустического канала связи авторы статьи [4] столкнулись с проблемой интерференции в бурильной колонне. В результате наблюдалось многолучевое распространение сигналов, приводящее к значительному сдвигу фаз и неравномерности амплитуды по частотам. Для решения этих проблем авторы используют некогерентную демодуляцию.

В результате удалось достичь скорости 15 бит/с на расстоянии 94,5 метров, что значительно превышает скорость передачи гидроимпульсных каналов связи.

В статье [5] предложена модель акустического канала связи для длинных бурильных колонн. Разработанная модель позволяет эффективно проектировать каналы связи с использованием технологии мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов. Оценка достоверности модели производилась путём сравнения с измерениями на бурильной колонне длиной 55 метров. Авторы уделяют особое внимание, что системы связи, рассчитанные на расстояние более 1,5 километров, должны учитывать длину замков для соединения бурильных труб. Для повышения эффективности длина бурильного замка не должна превышать нескольких сантиметров, тогда как длина труб может варьироваться до одного метра.

В процессе бурения возникает высокий уровень акустического шума, что негативно влияет на характеристики канала связи. Проблему можно решить путём использования алгоритмов обработки сигналов. Авторы статьи [6] используют два приёмника, расположенных на устье скважины, измеряющих телеметрический сигнал и шум с поверхности. Используя результаты измерений, была разработана математическая модель для увеличения отношения сигнал-шум. Стоит отметить, что наличие шумов на забое скважины во время обучения системы значительно уменьшает её эффективность.

Основной особенностью разрабатываемой ультразвуковой телеметрической системы является использование внутритрубного пространства в качестве запердельного волновода. Результаты, полученные в работах [7-8] показывают перспективность данного направления. В них даны результаты испытаний, направленных на создание модели затухания сигнала во внутритрубном пространстве, заполненном воздухом. В данной работе схема была модифицирована для работы в воде и при большем выходном напряжении.

## 1. Описание экспериментальной установки

Процесс передачи информационной посылки реализуется с использованием амплитудной модуляции. Основными элементами устройства являются ультразвуковые комбинированные приёмники и передатчики TR60-10H0Z-01 с рабочей частотой 60 кГц, имеющие герметичный корпус и работающие при размахе сигнала от пика до пика до 140 В, что обеспечивает повышенную мощность излучения.

Схема передатчика показана на рис. 1. Передатчик разработан на базе микроконтроллера PIC18F2455. Для формирования в пьезоизлучателе сигнала наибольшей амплитуды используется повышающий трансформатор T1 с коэффициентом трансформации 1:6,25. Чем меньше коэффициент трансформации, при одинаковом значении амплитуды выходного сигнала, тем меньше значение тока, потребляемого усилителем от источника питания. Сигналы в трансформатор вводятся через двухтактный парафазный усилитель на ключевых транзисторах VT8 и VT9, открывающиеся поочередно. Пары транзисторов VT4-VT5 и VT6-VT7 являются буферными усилителями для формирования сигнала, открывающего ключевые транзисторы VT8 и VT9 и представляют собой двухтактные усилители класса В, включённые по схеме с общим коллектором. Транзисторы VT2 и VT3 служат для того чтобы в промежутках между передачей информационных посылок транзисторы VT8 и VT9 были гарантированно закрыты, и ток от источника питания не протекал через первичные обмотки трансформатора T1. Для корректной работы двухтактного парафазного усилителя сигналы, поступающие на выходные транзисторы, должны быть сдвинуты по фазе относительно друг друга на 180°. В схеме передатчика это реализуется за счет использования инвертирующего усилителя на транзисторе VT1. Светодиод VD11 индицирует процесс передачи информации и включается при передаче информационной посылки. Для исключения повреждения схемы передатчика при неправильном подключении аккумуляторов в состав схемы входит диод VD1.

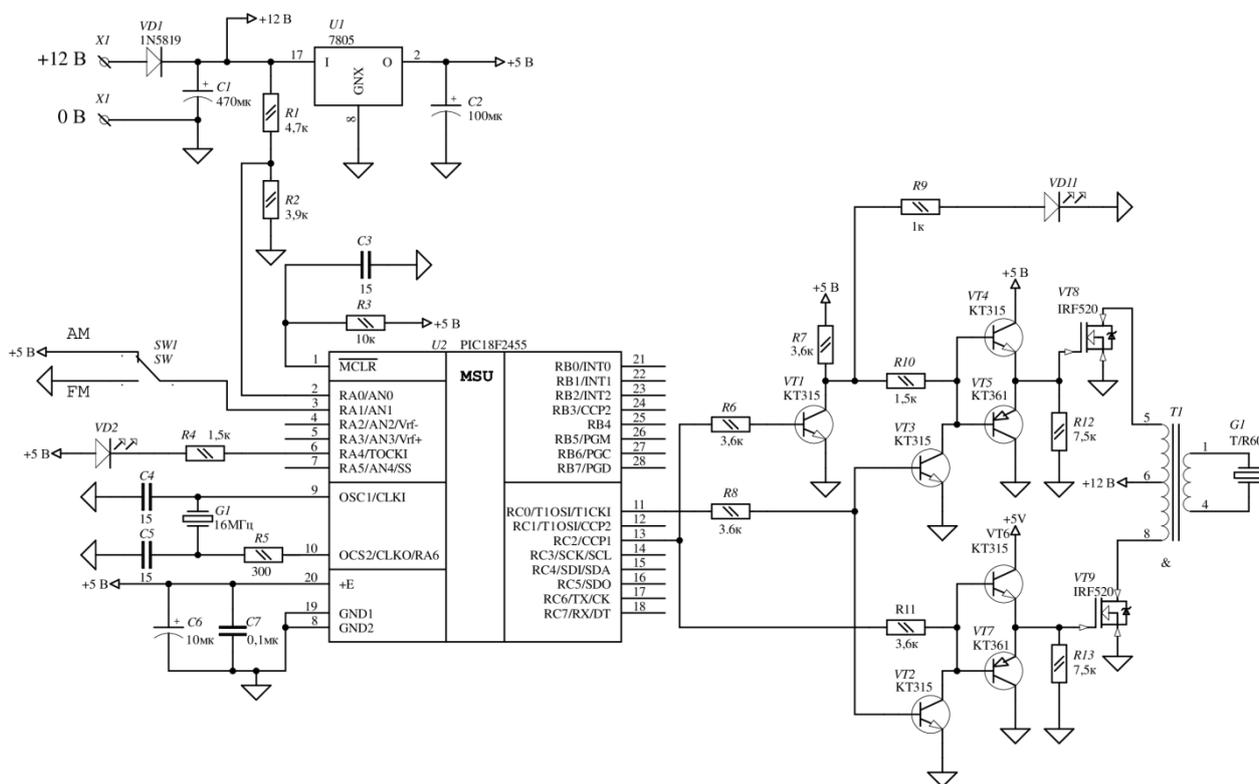


Рис. 1. Схема ультразвукового передатчика.

Передатчик формирует информационные послышки с использованием для представления логических единиц и нулей кодировки «Манчестер-II». Это связано с тем, что из всех рекомендованных способов представления логических единиц и нулей при организации процесса передачи информации в цифровой форме по беспроводным каналам она наиболее проста в процессе кодирования и декодирования. Ограничение на скорость передачи данных не является критическим для объёма передаваемых данных. Каждая информационная посылка состоит из набора идентичных информационных сообщений (рис. 2). Информационное сообщение состоит из:

- преамбулы (значение в шестнадцатеричной форме: AA);
- кода системы (значение в шестнадцатеричной форме: AA);
- информационного байта;
- байта контрольной суммы (младший байт арифметической суммы преамбулы, кода системы и информационного байта).

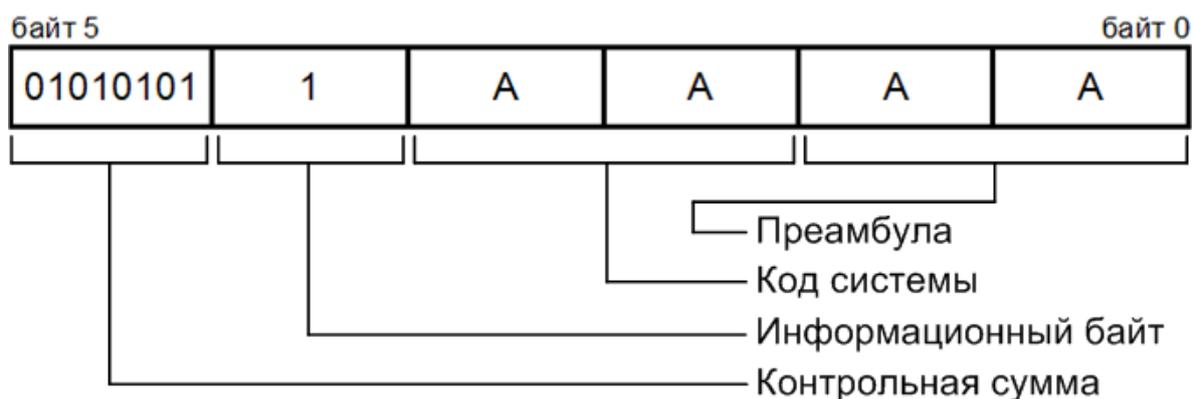


Рис. 2. Структура информационной посылки.

Информационный байт увеличивается на единицу перед каждой передачей (от нуля до FF). Потом цикл повторяется с нуля. Количество сообщений в посылке на первом этапе исследований выбрано равным 10. Между сообщениями в информационной посылке формируются паузы для возможности обработки информации приёмником. Данная структура информационной посылки связана с необходимостью обеспечения помехоустойчивости. После приёма каждого сообщения приёмник рассчитывает значение контрольной суммы на основании принятых данных преамбулы, кода системы и информационного байта, и сравнивает его с принятым значением контрольной суммы. В результате как минимум одно сообщение из состава информационной посылки будет принято без искажений.

Для обеспечения автономности процесса испытаний питание передатчика осуществляется от электрических аккумуляторов. Используются четыре последовательно соединённых литий-полимерных аккумуляторов с номинальным значением напряжения 3 В и ёмкостью 3000 мА/ч. Это обеспечивает среднее значение первичного напряжения питания передатчика 12 В. Выбор значения 12 В для первичного напряжения питания обусловлен следующими соображениями:

- при данном значении напряжения на элементах схемы передатчика уменьшается вероятность электрического пробоя при случайной разгерметизации схемы в процессе испытаний;

- упрощается процесс формирования необходимого напряжения на ультразвуковом передатчике и уменьшается значение тока, потребляемого выходным каскадом от первичного источника питания, как будет показано ниже.

Формирователь информационных сообщений разработан на основе микроконтроллера PIC18F2455. Выбор данной модели микроконтроллера связан с наличием в его составе схемы настройки тактовой частоты ядра без изменения значения частоты основного тактового генератора. Это позволяет максимально точно формировать сигналы информационного сообщения в соответствии с рабочей частотой ультразвукового приёмопередатчика. Способ организации электропитания микроконтроллера, подключение элементов основного тактового генератора и элементов схемы сброса при включении питания реализован на основе документации производителя микроконтроллера. Кроме формирования сигналов информационных сообщений в схеме передатчика реализованы дополнительные функции. Во-первых, это контроль за состоянием аккумуляторов и отображение их состояния для пользователей, что реализуется за счёт использования делителя напряжения на резисторах R1, R2 (согласование значения первичного напряжения питания с максимально допустимым напряжением микроконтроллера) и светодиода VD2. Программа микроконтроллера периодически определяет значение первичного напряжения питания при помощи модуля аналого-цифрового преобразователя, входящего в состав микроконтроллера. Если значение напряжения первичного источника питания снижается до 11 В, микроконтроллер прекращает формировать информационные сообщения и активирует светодиод VD2. Это обеспечивает защиту от глубокого разряда аккумуляторов, который может привести к потере их ёмкости. Во-вторых, обеспечивается индикация формирования информационных сообщений светодиодом VD11. Переключатель SW1 может использоваться для выбора способа модуляции при формировании информационного сообщения (амплитудная модуляция/частотная модуляция).

Схема приёмника показана на рис. 3. Диоды VD1, VD2 (KD522) используются для защиты от мощных импульсных помех. Пары транзисторов VT1-VT2 и VT3-VT4 – это резонансные усилители с попарно расстроенными контурами. Это схемное решение позволяет реализовать приближающуюся к прямоугольной форму амплитудно-частотной характеристики усилителя в полосе пропускания. Использование полевого транзистора в качестве входного необходимо для согласования выходного сопротивления ультразвукового приёмника.

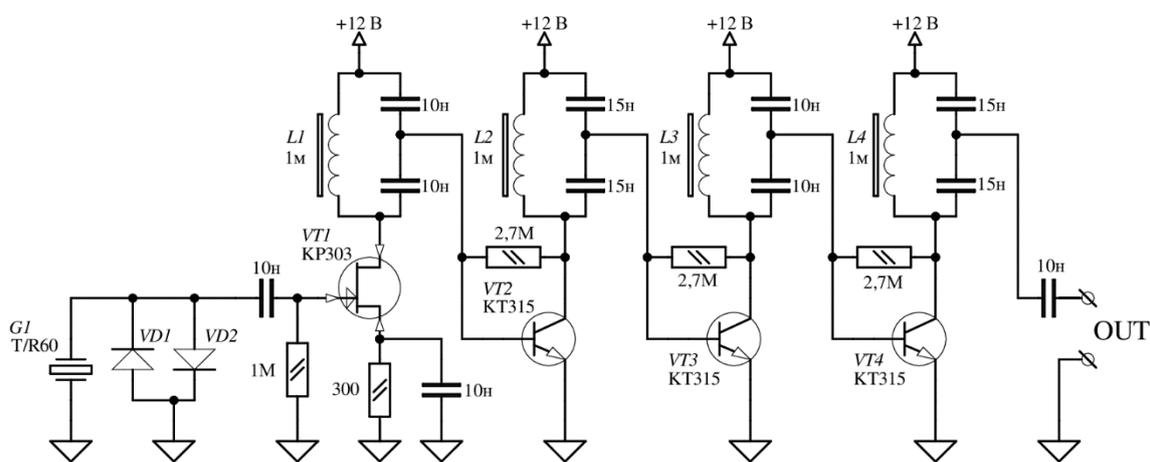
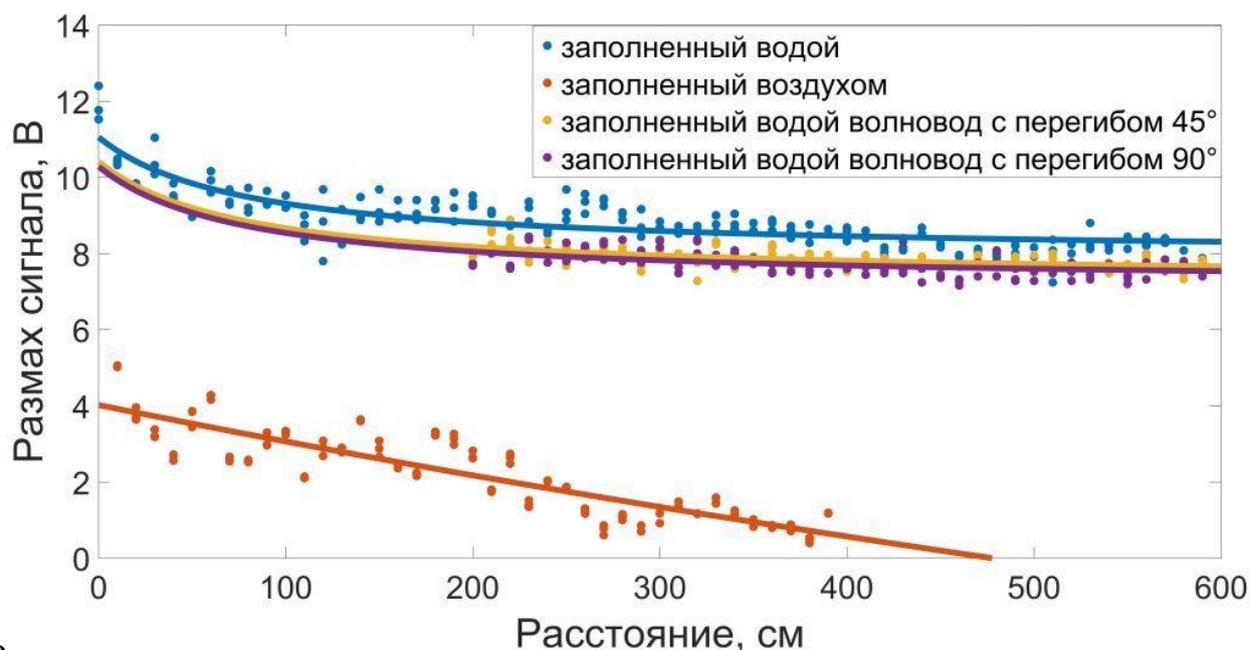


Рис. 3. Схема ультразвукового приёмника.

## 2. Результаты экспериментов

На рис. 4 приведены графики затухания сигнала в волноводе (уменьшение значения сигнала от пика до пика), представляющем собой трубу длиной шесть метров, на конце которой закреплён приёмник, а передатчик свободно перемещается по длине трубы. Диаметр трубы – 100 мм, материал трубы – пластик. Проведены следующие серии измерений:

- заполненный водой волновод;
- заполненный воздухом волновод;
- заполненный водой волновод с перегибом  $45^\circ$  на расстоянии 2 м от приёмника;
- заполненный водой волновод с перегибом  $90^\circ$  на расстоянии 2 м от приёмника.



ю

Рис. 4. Затухание сигнала в волноводе

Модель для заполненного водой волновода имеет следующий вид:

$$a = \frac{(1626,17 + 15,00 \cdot x)}{(147,15 + 1,89 \cdot x)}, \quad (1)$$

где  $x$  – расстояние между начальной точкой и приёмником.

При наличии перегибов трубы на  $45^\circ$  и  $90^\circ$  в формулу (1) необходимо добавить слагаемые  $-0,64$  и  $-0,77$  соответственно. Таким образом, наличие перегиба вызывает резкое затухание сигнала на  $0,65$  дБ. В менее плотной среде (воздухе) затухание линейно зависит от расстояния; амплитуда сигнала снижается до уровня шума уже на расстоянии  $4$  м.

## Заключение

Представленная ультразвуковая приёмо-передающая система связи позволяет передавать цифровой сигнал на частоте  $60$  кГц по закрытому волноводу, наполненному жидкостью. Затухание сигнала при отдалении передатчика от приёмника более чем на  $1$  м увеличивается незначительно. Затухание на  $0,65$  дБ наблюдается при наличии перегиба закрытого волновода.

**Финансирование:** исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 22-29-00024.

### Литература

1. Pagtalunan J. et al. Experimental study on repeater-free acoustic telemetry for downhole operations //Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – Т. 202. – С. 108551.
2. Ayat M. et al. Design of multiple modulated frequency lock-in amplifier for tapping-mode atomic force microscopy systems //IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2016. – Т. 65. – №. 10. – С. 2284-2292.
3. Schlecker B. et al. An analog high-speed single-cycle lock-in amplifier for next generation AFM experiments //2018 Ieee Sensors. – IEEE, 2018. – С. 1-4.
4. Zhao A. S. et al. Response analyses on the drill-string channel for logging while drilling telemetry //Petroleum Science. – 2023.
5. Gutierrez-Estevez M. A. et al. Acoustic channel model for adaptive downhole communication over deep drill strings //2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. – IEEE, 2013. – С. 4883-4887.
6. Sinanovic S., Johnson D. H., Gardner W. R. Directional propagation cancellation for acoustic communication along the drill string //2006 IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing Proceedings. – IEEE, 2006. – Т. 4. – С. IV-IV.
7. Стукач О.В. и др. Разработка ультразвукового приемопередатчика для скважинной телеметрии //Журнал радиоэлектроники. – 2022. – №. 11.
8. Стукач О.В. и др. Регрессионная модель затухания ультразвукового сигнала в скважине //Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 3.

#### Для цитирования:

Стукач О.В., Ершов И.А., Быков С.В. Приёмо-передающее устройство для исследования канала связи забой-устье. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.11>