

DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-10

**СПЕКТРАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ
ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ****М. В. Романовский^{1,a}, А. И. Солдатов^{1,2,b}**¹ Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск,
Российская Федерация^a ✉ noiremagnus@gmail.com, ^b asoldatof@mail.ru

Аннотация: в статье приведен обзор существующих систем физической защиты магистральных трубопроводов от несанкционированного действия. Показано, что наиболее перспективной будет схема охраны с акустическим датчиком и оптико-электронной системой распознавания, действующая по алгоритму: срабатывание акустического датчика — подтверждение по акустическому алгоритму — подтверждение оптико-электронной системой наблюдения — тревога. В основе распознавания акустических сигналов использован метод прямого преобразования Фурье для определения частотного спектра акустических сигналов и сравнения их с эталонными. Вышеупомянутый метод прямого преобразования основан на разложении суммарных акустических сигналов, улавливаемых датчиком, на исходные синусоиды. Данная работа направлена на модернизацию системы физической защиты по отношению к магистральным трубопроводам по доставке нефтепродукта и как следствие — к повышению уровня защищенности таких объектов. Предлагаемый метод модернизации системы физической защиты позволит обеспечить условия для однозначного определения несанкционированных действий путем анализа и сопоставления звукового сигнала с базой сигналов предварительно записанных звуков и решить ряд проблем актуальной темы обеспечения безопасности и сохранности линейных магистральных нефте- и газо-трубопроводов. Также такое решение позволит минимизировать частоту ложных срабатываний технических средств физической защиты.

Ключевые слова: система физической защиты, магистральный трубопровод, акустический датчик, преобразование Фурье, частотный спектр сигнала.

Для цитирования: Романовский М. В., Солдатов А. И. Спектральная обработка акустических сигналов в системах физической защиты магистральных трубопроводов. *Успехи кибернетики*. 2023;4(1):72–78. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-10.

Поступила в редакцию: 09.02.2023.

В окончательном варианте: 22.03.2023.

SPECTRAL PROCESSING OF ACOUSTIC SIGNALS FOR PIPELINE SECURITY SYSTEMS**M. V. Romanovskiy^{1,a}, A. I. Soldatov^{1,2,b}**¹ Surgut State University, Surgut, Russian Federation² Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation^a ✉ noiremagnus@gmail.com, ^b asoldatof@mail.ru

Abstract: this paper is an overview of the existing pipeline security systems preventing unauthorized access to the pipe. It is shown that the most suitable solution is an acoustic sensor and optoelectronic recognition system. It operates as follows: the acoustic sensor is activated – the acoustic algorithm confirms the alarm – the optoelectronic system confirms the alarm – the alarm is triggered. The direct Fourier transform is used for acoustic signal recognition to identify the frequency spectrum of acoustic signals and compare it with the reference one. The above-mentioned direct transform includes a decomposition of the total acoustic signal from the sensor into original sinusoids. The purpose of this study is to upgrade the oil pipeline security systems for better efficiency. The proposed upgrade method unambiguously identifies any unauthorized access by analyzing and comparing the audio signal with the reference signal from a database of pre-recorded sounds to protect oil and gas pipelines. The solution also minimizes the false alarm rate.

Keywords: security system, main pipeline, acoustic sensor, Fourier transforms, signal frequency spectrum.

Cite this article: Romanovskiy M. V., Soldatov A. I. Spectral Processing of Acoustic Signals for Pipeline Security Systems. *Russian Journal of Cybernetics*. 2023;4(1):72–78. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-10.

Original article submitted: 09.02.2023.

Revision submitted: 22.03.2023.

Введение

На данный момент протяженность трубопровода составляет свыше 250 тыс. км. Наиболее уязвимым объектом в плане несанкционированных действий в виде хищения с помощью незаконных врезок со стороны населения является магистральный трубопровод.

По экспертным оценкам, в России количество похищенных тонн нефти достигает 5 миллионов, причем ежегодно, при этом оценочный ущерб составляет 800 миллионов долларов. И это с учетом только прямых потерь, без затрат на ремонт и экологических последствий. По данным ПАО «Транснефть», всего в период с 2003 по 2012 г. в России было выявлено 4779 несанкционированных врезок в магистральные нефтепроводы [1].

В перечне угроз безопасности магистральным трубопроводам доминируют кражи нефти и нефтепродуктов из несанкционированных врезок, доля которых в структуре противоправных посягательств в 2020 году составила 55 %. В 2020 году на магистральных нефтепроводах и нефтепродуктопроводах была выявлена 141 несанкционированная врезка. В последние годы преступников в большей степени привлекают магистральные нефтепродуктопроводы, так как нефтепродукты, изъятые из них, можно без переработки отправлять на рынок [1].

Научная задача заключается в повышении безопасности и обоснованности решений, принимаемых при проектировании систем физической защиты, путем внедрения методов, основанных на информационных критериях оптимальности, комбинирования методов оптимизации и использования современных форм обработки информации для обеспечения необходимой безопасности магистральных трубопроводов [2].

Незаконная врезка в трубопровод может нанести значительный ущерб и создать угрозу безопасности как самого трубопровода, так и окружающей среды. Чтобы обнаружить эти незаконные врезки, многие компании по транспортировке углеводородов полагаются на акустические датчики для контроля звука потока жидкости в трубопроводе. Анализируя звуковую сигнатуру жидкости, можно выявить любые аномалии или отклонения, также они могут свидетельствовать о наличии несанкционированной врезки.

Акустические датчики работают путем преобразования звуковых волн в электрические сигналы, которые затем могут быть проанализированы специализированным программным обеспечением. Эти датчики обычно устанавливаются по всей длине трубопровода, а собираемые ими звуковые данные передаются в центральную систему мониторинга в режиме реального времени. Затем программное обеспечение анализирует звуковую характеристику жидкости, чтобы выявить любые изменения или сбои, которые могут указывать на несанкционированный врез.

Одним из ключевых показателей незаконной врезки является изменение давления и расхода жидкости в трубопроводе. Эти изменения могут привести к значительному отклонению звуковой характеристики жидкости, которое датчики могут обнаружить и предупредить компанию, обслуживающую трубопровод, о необходимости принятия мер. В дополнение к изменениям давления незаконные врезки также могут вызывать изменения вибрации, турбулентности и интенсивности текучести жидкости, которые могут быть обнаружены датчиками, но при этом необходимо учитывать вклад фоновых шумов и вибраций от внешней среды, поэтому еще одним важным фактором, который следует учитывать при использовании акустических датчиков для обнаружения незаконных врезок, является калибровка датчиков. Очень важно точно откалибровать датчики, чтобы они могли обнаруживать даже незначительные изменения звуковой характеристики. Программное обеспечение, используемое для анализа звуковых данных, также следует регулярно обновлять и калибровать, чтобы оно могло точно идентифицировать любые изменения. Но такой метод не может точно определить источник несанкционированного действия и его условия.

В данной работе планируется модернизировать систему обработки сигнала с акустических датчиков для однозначной регистрации несанкционированного действия в виде незаконной врезки путем определения вида источника звука с помощью регистрации и анализа частоты звука, а впоследствии — сопоставления его с базой звуков. Таким образом, можно будет однозначно определить, с помощью ка-

кого оборудования производится врезка, например, пробивание тела трубопровода с помощью кувалды, сверление или вваривание. Кроме того, это позволит минимизировать частоту ложных срабатываний технических средств системы физической защиты.

Планируется этого добиться путем анализа частоты зарегистрированного звука на основе того, что различные материалы издадут разные звуки в зависимости от их физических свойств, таких как плотность, эластичность и внутренняя структура. Например, плотный и твердый предмет будет издавать резкий высокий звук, а более мягкий или более пористый предмет будет издавать более глухой и низкий звук. Для точного анализа звука, производимого ударом, важно учитывать несколько факторов. Например, частота звука может предоставить информацию о плотности и твердости объекта, а продолжительность и затухание звука могут указывать на удаленность объекта. Анализируя эти характеристики, можно определить состав, удаленность и другие характеристики объекта.

Для такого анализа может использоваться метод преобразования Фурье, чтобы определить, например, сверлится ли трубопровод дрелью. Этот метод основан на преобразовании временных сигналов в частотные составляющие. При анализе звука от сверления трубы дрелью можно определить частоту звука, характерную для этой операции, и сравнить ее с частотами других звуков, чтобы убедиться в том, что происходит именно сверление трубы.

Метод преобразования Фурье

Метод прямого преобразования Фурье основан на разложении суммарных акустических сигналов, улавливаемых датчиком, на исходные синусоиды. Процессом математического разложения сложной периодической функции на временном интервале является преобразование ее в ряд из более простых, элементарных ортогональных функций, таких как синусоиды и косинусоиды. Он позволяет исследовать составляющие частоты в звуковой волне и представляет ее в виде суммы синусоидальных компонент разных частот. Это может быть полезно для анализа и улучшения качества звука [3].

Процесс преобразования и анализа сигнала звука данным методом можно описать следующим образом:

1. Мембрана микрофона вибрирует от звуковых волн, которые затем преобразуются в аналоговые электрические колебания. В результате чего можно получить спектр частоты звука временной функции, представленный на рисунке 1 [4]. Также можно получить спектр сигнала амплитуды, представленный на рисунке 2.

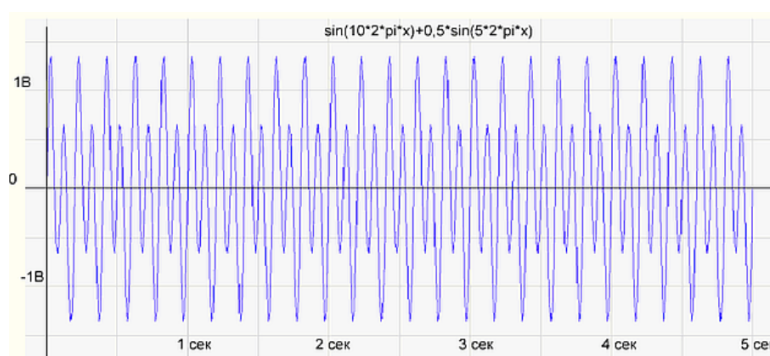


Рис. 1. Функция сигнала спектра звука

2. Производится дискретизация аналогового электрического сигнала в цифровую форму. Аналоговый сигнал характеризуется бесконечным множеством непрерывных значений амплитуды во времени. В процессе измерения мы можем определить только ограниченный набор дискретных значений, выраженных в конечные моменты времени. Эти значения обычно выражаются через равные промежутки времени с частотой, например, 16000 или 22000 Гц [4].

3. Следующим шагом является прямое дискретное преобразование Фурье. В ходе исследования выделяют короткий кадр (интервал) звука, состоящий из дискретных отсчетов, который считают периодическим, и применяют к нему преобразование Фурье. В результате получается массив комплексных чисел, содержащий информацию об амплитудном и фазовом спектрах анализируемого кадра. Спектры также дискретные, с шагом, равным (частота дискретизации)/(количество отсчетов). Это означает, что

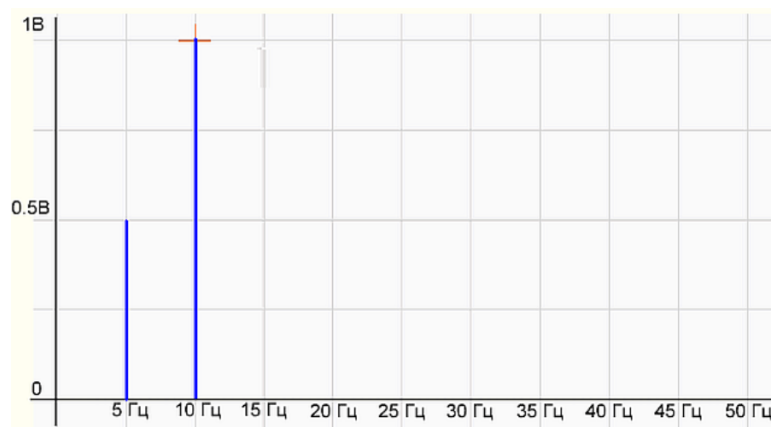


Рис. 2. Спектр сигнала амплитуды звука

чем больше выборок берется, тем точнее становится разрешение по частоте. Длительность кадра обычно составляет приблизительно от 30 миллисекунд до 1 секунды. Чем он короче, тем лучше разрешение по времени, но хуже разрешение по частоте [4].

Для анализа также применим алгоритм быстрого преобразования Фурье, который оптимизирует количество необходимых математических операций. Одним из условий для его применения является то, что количество отсчетов должно быть кратным степени двойки, таким как 256, 512, 1024 и т.д. [4, 5].

4. Точное определение частоты. Дискретное преобразование Фурье обеспечивает дискретный спектр с каждым значением амплитуды, разделенным на равные интервалы частоты. Если частота в сигнале кратна шагу, равному (частота дискретизации)/(количество выборок), результатом будет резкий всплеск. Однако, если частота лежит между границами ступеней ближе к середине, пик будет иметь усеченную вершину, что усложнит определение частоты [4].

Преобразование Фурье позволяет представить непрерывный сигнал $f(x)$, заданный на отрезке $\{0, T\}$, в виде суммы бесконечного числа тригонометрических функций (синусоид и/или косинусоид) с конкретными амплитудами и фазами, рассматриваемых также на отрезке $\{0, T\}$. Этот ряд называется рядом Фурье [4, 5].

В данной работе предполагается использовать алгоритм преобразования Фурье, такой как быстрое преобразование Фурье. Этот алгоритм преобразует цифровые данные звука в комплексные числа, которые представляют собой спектр звука. Данный метод для теоретических опытов можно реализовать при помощи программного обеспечения MATLAB. MATLAB предоставляет удобство в автоматическом удалении ненужных объектов, но при работе с более объемными массивами данных может выдавать ошибки из-за недостатка памяти. Чтобы исправить эту проблему, можно использовать процедуру `clear`, указав имя объекта, который необходимо удалить, чтобы освободить память. Таким образом, можно улучшить качество звука и избавиться от посторонних шумов [6].

Практический результат

С помощью вышеописанного метода преобразования Фурье можно избавиться от посторонних шумов и привести спектр в подходящий для анализа вид. Далее на основе сопоставления можно определить источник звука и его удаленность от акустического датчика на основе эффекта затухания и его спектральной амплитуды.

С помощью программного обеспечения можно привести вид спектра частоты звука представленный на рисунке 3, к подходящему для анализа и сопоставления с базой звуков изображенному на рисунке 4.

Таким образом, несмотря на то, что полезного сигнала не видно на фоне шума в исходном сигнале, спектральная характеристика позволяет определить его частоту и амплитуду [3].

Кроме этого, для сравнения можно использовать другие программы для обработки звука и сравнить результат, так, например, спектр частоты звука с уменьшением шума представлен на рисунке 5. Для этого был использован записанный с помощью микрофона и программного обеспечения Mixcraft Pro Studio 7 звук от пяти ударов металлическим предметом о металлическую трубу.

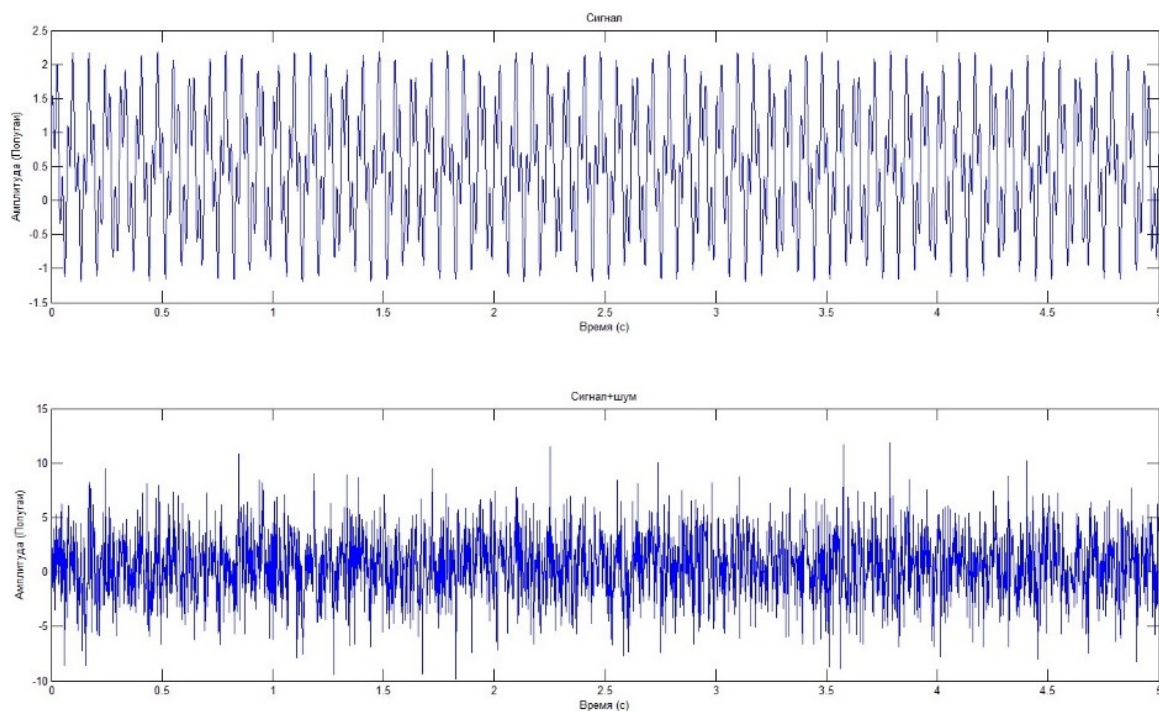


Рис. 3. Временная функция и спектр сигнала

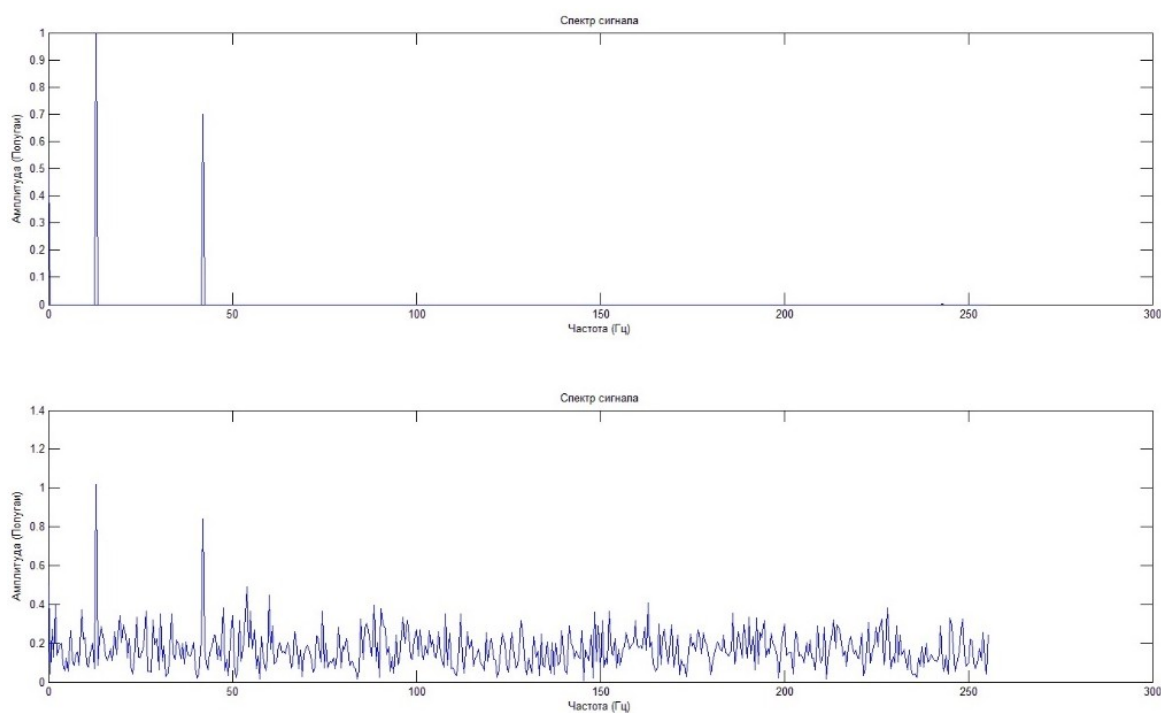


Рис. 4. Временная функция и спектр сигнала после обработки

При ближайшем рассмотрении и обработке в программе Adobe Audition 2022 можно заметить угасающий спектр звука, представленный на рисунке 6.

Таким образом, очищенный сигнал можно сопоставить с базой сигналов и определить род источника звука. Например, по спектру рисунка 4 можно сделать вывод о непродолжительном событии, так как спектр быстро затухает, а анализируя спектр, представленный на рисунке 3, можно предположить, что это систематическое воздействие на объект в виде периодических ударов.

Для данного эксперимента использовались следующие условия:

- источник звука: 5 ударов металлическим предметом по металлической трубе;

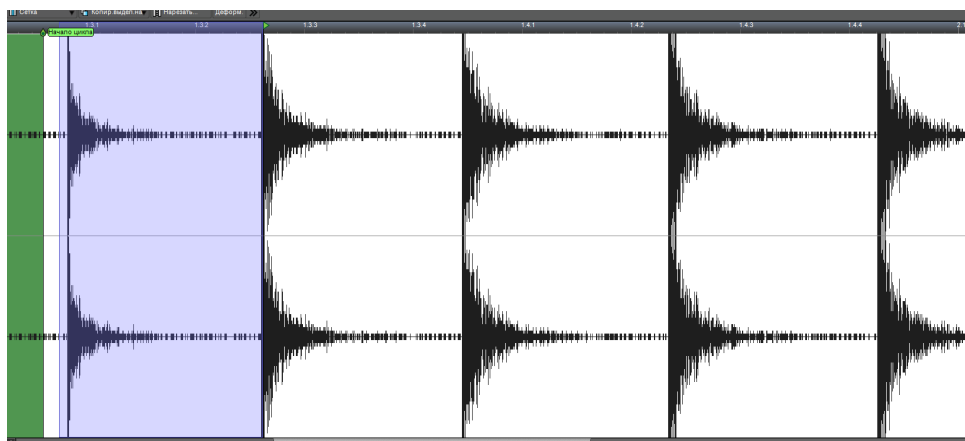


Рис. 5. Спектр частоты звука удара о металлическую трубу

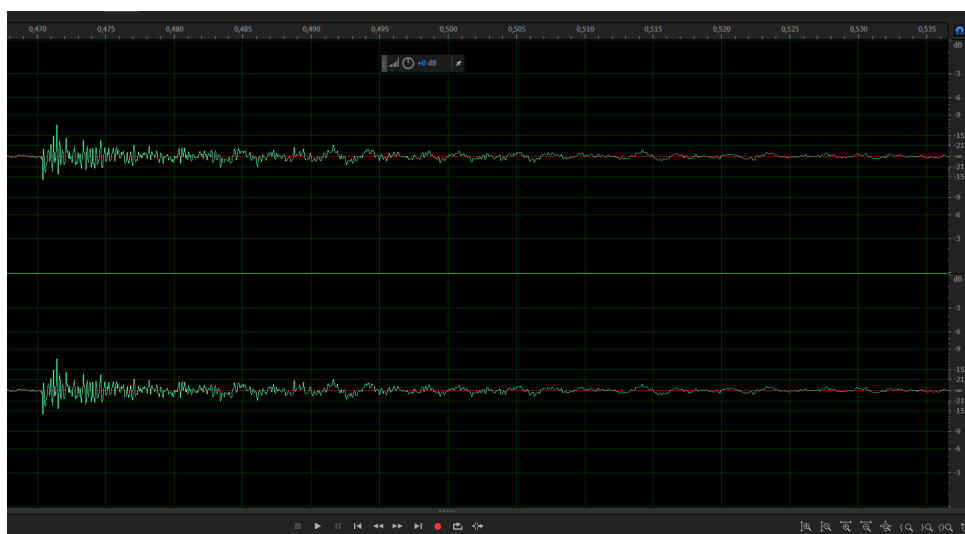


Рис. 6. Увеличенный спектр частоты одного удара

- устройство: микрофон Genius PERFEO M-3 с ветрозащитной насадкой (губкой) для подавления шумов;
- используемое ПО для записи и отображения спектра звука: Mixcraft Pro Studio 7, Adobe Audition 2022.

К сожалению, использование программного обеспечения, такого как MATLAB, не подходит для опытно-промышленной эксплуатации, так как необходимо проводить анализ и очищение звука от посторонних шумов на уровне программного кода. Для этого более целесообразно использовать анализирующий и преобразующий код, например, на языке программирования Java или C++, на основе вышеописанного метода преобразования Фурье. В перспективе это позволит модифицировать и организовать систему физической защиты, как это представлено на рисунке 7.

Заключение

Вышеописанная методика обработки частоты звука позволит модернизировать систему физической защиты путем анализа и определения несанкционированных действий в отношении магистральных трубопроводов и уменьшить частоту ложных срабатываний системы безопасности.

Далее планируется записать множество вариаций звуковых частот разнообразных воздействий на металлическую конструкцию, например, сверления, сварки и т.д., и обработать их методом прямого преобразования Фурье. На следующем этапе предполагается рассмотреть процессы автоматизации обработки спектральных частот сигналов звука на основе методов системы поддержки принятия решений.

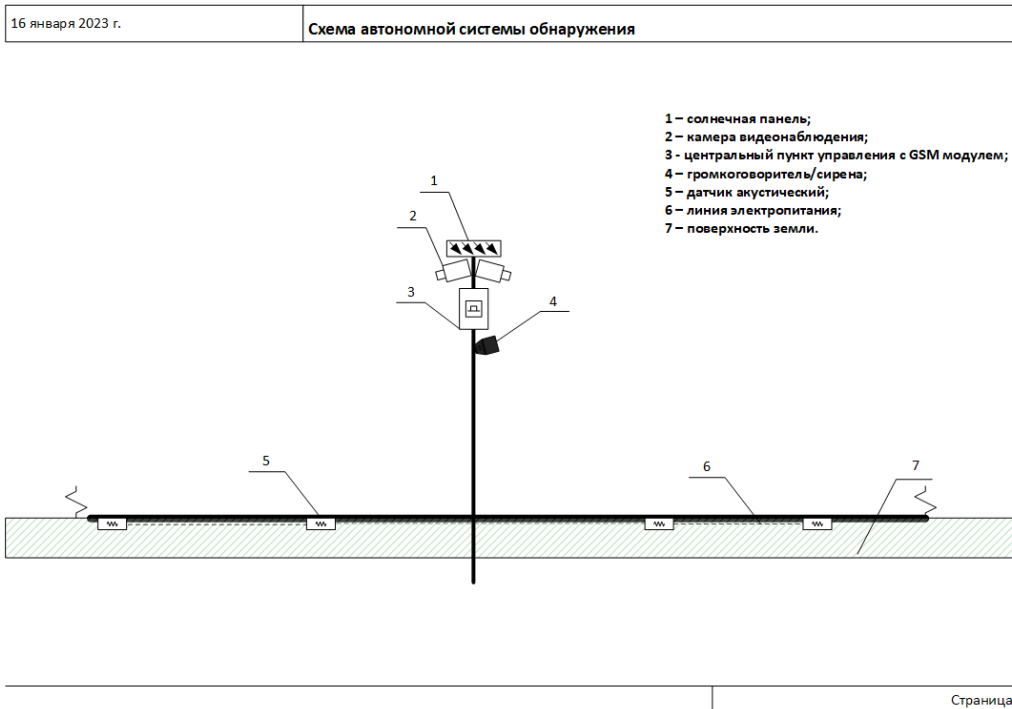


Рис. 7. Схема размещения датчиков системы физической защиты вдоль линии магистрального трубопровода

ЛИТЕРАТУРА

1. Публичное акционерное общество «Транснефть». Режим доступа: <http://www.transneft.ru>.
2. Костин В. Н. *Методики, модели и методы обоснования и разработки систем физической защиты критически важных объектов*: автореферат дис. ... доктора технических наук. Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова; 2021. 38 с. Режим доступа: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01010768066?page=1&rotate=0&theme=black>.
3. Князев Б. А., Черкасский В. С. Дискретное преобразование Фурье — как это делается. *Вестник новосибирского государственного университета. Серия: Физика*. 2008;3(4):74–86.
4. Степаненко М. А., Фунтиков Е. А. Оцифровка и анализ акустических сигналов на платформе Android. *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. 2016;4:31–36. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28363195>.
5. Шамсиев Э. Х., Павлов А. Д. Методы голосовой идентификации человека. *Профессиональные коммуникации в научной среде — фактор обеспечения качества исследований*: сборник материалов XI Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург: ООО «Скифия-принт»; 2022. С. 138–142. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_49432585_89798867.pdf.
6. Алексеев М. С., Деревянкина В. С., Куцевалова В. В., Сивцова Е. И., Маегов С. Е. Методология сбора и обработки голосовых данных. *Решетневские чтения: материалы XXV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева*. В 2-х частях. Часть 2 / Под общей редакцией Ю. Ю. Логина. Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева»; 2021. С. 157–158. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47711824>.