

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

## DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 622.691.48

doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-9

### АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ПЕРЕТОКА ГАЗА ЧЕРЕЗ КРАНОВЫЙ УЗЕЛ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ

Д. С. Бояркин<sup>1</sup>, В. Д. Ежижанский<sup>2</sup>, Д. А. Голушко<sup>3</sup>, И. Р. Абузьяров<sup>4</sup>, А. В. Лысенко<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Научно-производственное предприятие «Рубин», Пенза, Россия

<sup>5</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> boyarkyndmytry@gmail.com, <sup>2</sup> vityastalkerxdxd@gmail.com, <sup>3</sup> dmitgoluschko@yandex.ru,

<sup>4</sup> 0400@npp-rubin.ru, <sup>5</sup> lysenko\_av@bk.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Длительная эксплуатация запорной арматуры газопроводов приводит к постепенному износу элементов уплотнения шаровых кранов и, как результат, к их негерметичности. Это является причиной подавляющего большинства аварий на магистральных газопроводах и компрессорных станциях. Разработан алгоритм определения наличия утечки газа и измерения величины его расхода в кране при потере им герметичности с помощью регистрации и анализа акустического сигнала, производимого газом, истекающим через неисправный крановый узел. Обнаружение утечки на ранних стадиях позволяет вовремя провести профилактические мероприятия по ее устранению, сохранить кран в рабочем состоянии и избежать последствий, связанных с аварийно-восстановительными работами при ликвидации чрезвычайных ситуаций. *Материалы и методы.* Для обнаружения утечек газа в запорной арматуре магистральных газопроводов путем регистрации и анализа акустического сигнала применяется метод акустико-эмиссионного контроля. Проанализирован состав аппаратной части устройства определения перетока, предназначенного для обнаружения и определения степени утечки газа через крановый узел трубопроводной арматуры. *Результаты и выводы.* Предложено описание варианта конструкции и структурная схема устройства определения перетока газа. Приведено описание алгоритма работы устройства и его блок-схема. Сделан вывод о необходимости и актуальности применения предложенного алгоритма определения величины перетока газа через крановый узел трубопроводной арматуры.

**Ключевые слова:** трубопроводная арматура, запорная арматура, шаровый кран, утечка газа, техническое обслуживание, алгоритм, микроконтроллер

**Для цитирования:** Бояркин Д. С., Ежижанский В. Д., Голушко Д. А., Абузьяров И. Р., Лысенко А. В. Алгоритм определения величины перетока газа через крановый узел трубопроводной арматуры // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 1. С. 72–79. doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-9

## METHODOLOGY FOR DETERMINING THE AMOUNT OF GAS FLOW THROUGH THE VALVE ASSEMBLY OF PIPELINE FITTINGS

D.S. Boyarkin<sup>1</sup>, V.D. Yezhizhanskiy<sup>2</sup>, D.A. Golushko<sup>3</sup>, I.R. Abuzyarov<sup>4</sup>, A.V. Lysenko<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Scientific and Production Enterprise "Rubin", Penza, Russia

<sup>5</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> boyarkyndmytry@gmail.com, <sup>2</sup> vityastalkerxdxd@gmail.com, <sup>3</sup> dmitgoluschko@yandex.ru,

<sup>4</sup> 0400@npp-rubin.ru, <sup>5</sup> lysenko\_av@bk.ru

**Abstract.** *Background.* Prolonged operation of gas pipeline shut-off valves leads to gradual wear of the sealing elements of ball valves and, as a result, to their leakiness. This is the cause of the vast majority of accidents at main gas pipelines and compressor stations. A technique has been developed to determine the presence of a gas leak and measure the amount of its flow in a crane when it loses its tightness by recording and analyzing the acoustic signal produced by gas flowing through a faulty crane assembly. Detection of a leak at an early stage allows timely preventive measures to eliminate it, keep the crane in working condition and avoid the consequences associated with emergency recovery operations. *Materials and methods.* To detect gas leaks in the shut-off valves of main gas pipelines by recording and analyzing the acoustic signal, the acoustic emission control method is used. The composition of the hardware of the device (flow sensor) designed to detect and determine the degree of gas leakage through the valve assembly of the pipeline fittings is analyzed. *Results and conclusions.* A description of the design variant and a block diagram of the gas flow sensor are proposed. The description of the operation of the device's software module and the flowchart of the algorithm are given. The conclusion is made about the necessity and relevance of using the proposed method for detecting gas leaks in shut-off valves of main gas pipelines.

**Keywords:** pipeline fittings, shut-off valves, ball valve, gas leak, maintenance, algorithm, microcontrollers

**For citation:** Boyarkin D.S., Yezhizhanskiy V.D., Golushko D.A., Abuzyarov I.R., Lysenko A.V. Methodology for determining the amount of gas flow through the valve assembly of pipeline fittings. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(1):72–79. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-9

### Введение

Трубопроводный транспорт имеет особое значение для газовой отрасли Российской Федерации. Протяженность магистральных газопроводов (МГ) России на момент 2024 г. составляет порядка 176 тысяч километров и непрерывно возрастает. Рабочие давления МГ увеличиваются, газопроводы прокладываются во все более сложных климатических и инженерно-геологических условиях.

Транспортировка газа и газотранспортная система в целом относится к опасным производственным объектам и является технически сложной отраслью, сопряженной с высокими рисками для жизни и здоровья как для персонала, непосредственно осуществляющего техническое обслуживание объектов, так и людей, проживающих рядом с газопроводами. По данным Ростехнадзора, ежегодно на линейных частях магистральных газопроводов происходят десятки инцидентов и аварий [1]. Подавляющее большинство аварий происходит вследствие утечек газа, возникающих по разным причинам [2–4]. Последствия таких утечек представляют серьезную опасность для человека, оборудования и окружающей среды, а также могут повлечь значительные финансово-экономические потери в виде недопоставок газа потребителям и штрафных санкций<sup>1</sup>.

Под утечкой понимается неорганизованная эмиссия природного газа, поступающая в атмосферу в виде ненаправленных потоков в результате нарушения герметичности оборудования<sup>2</sup>. Среди различных источников утечек газа существенную роль играет негерметичность затвора запорной арматуры. Краны становятся негерметичными в процессе их эксплуатации и воздействия механических примесей, перемещающихся с транспортируемым газом [5].

Безопасность и эффективность работы всей газотранспортной системы, в том числе экономическая, во многом зависит от текущего состояния трубопроводной арматуры (ТПА) газопроводов. К ТПА относятся шаровые краны (ШК), различные задвижки и запорная арматура (ЗА), обеспечивающие перекрытие газопровода и остановку потока газа<sup>3</sup>. Краны ТПА должны обеспечивать стабильность работы и герметичность в течение всего срока службы. От работоспособности ТПА зависит, как быстро будет локализован участок, на котором произошла разгерметизация газопровода в случае аварии.

<sup>1</sup> ГОСТ Р 59061–2020. Охрана окружающей среды. Загрязнение атмосферного воздуха. Термины и определения : национальный стандарт РФ.

<sup>2</sup> СТО Газпром 2-3.5-454-2010. Правила эксплуатации магистральных газопроводов : стандарт организации.

<sup>3</sup> ГОСТ 24856–2014. Арматура трубопроводная. Термины и определения : межгосударственный стандарт.

В связи с этим возникает необходимость разработки устройства, способного определять текущее состояние шарового крана, а именно его герметичность. Герметичность необходимо контролировать ввиду постоянно происходящего износа как уплотнительных седел шарового крана, так и запорного элемента. При отсутствии герметичности ЗА газ продолжает перетекать по затвору из одной отсекаемой части газопровода в другую. Данное явление получило название «переток». Степень перетока может быть выражена количественной характеристикой, отражающей величину утечки газа через крановый узел.

Определение перетока на ранних стадиях позволяет вовремя провести профилактические мероприятия по его устранению, сохранить кран в рабочем состоянии и избежать экономических потерь, связанных с аварийно-восстановительными работами при ликвидации ЧС.

Помимо перетока, газ может уходить также через уплотнения шпинделя кранового узла. В этом случае утечка газа происходит в окружающую среду, что при больших масштабах утечки приводит к образованию скоплений газа вокруг ШК, что является ЧС и требует немедленного выезда аварийной бригады для ликвидации течи<sup>1</sup>.

Таким образом, разрабатываемое устройство должно обеспечивать обнаружение наличия и определение степени перетока через затвор крана в закрытом положении (степень герметичности по отношению к изолированным участкам газопровода), а также определять наличие утечек газа в атмосферу на шаровом кране при любом положении затвора (степень герметичности МГ по отношению к внешней среде).

### Описание аппаратной части устройства определения перетока газа

Принцип работы устройства определения перетока газа основан на применении метода акустико-эмиссионного контроля (АЭК) – это метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации и анализе акустических волн, возникающих при истечении газа через негерметичную запорную арматуру. Используя данный метод, путем регистрации и анализа акустического сигнала можно определить наличие перетока и оценить количественные потери газа в кране при потере им герметичности.

Структурная схема устройства определения перетока газа представлена на рис. 1.

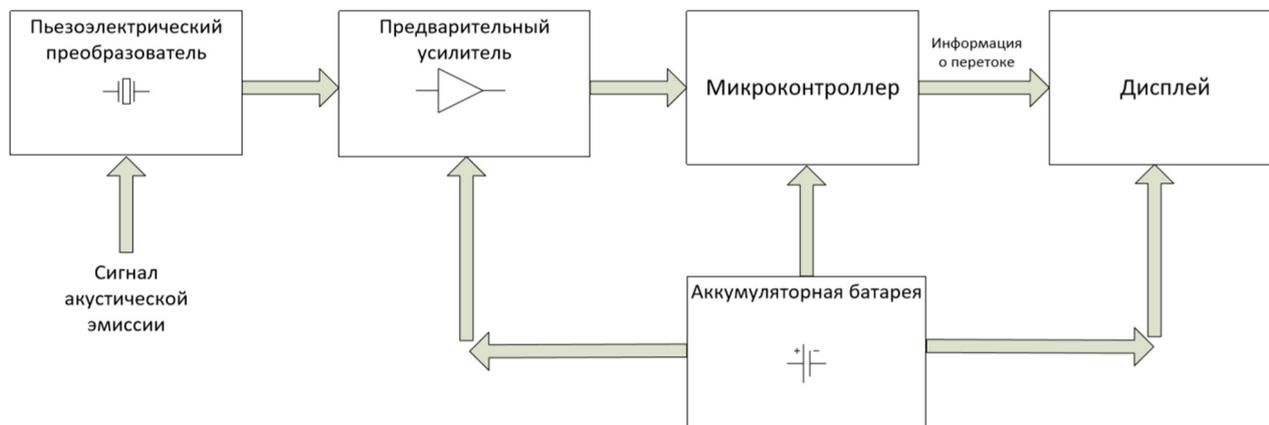


Рис. 1. Структурная схема устройства определения перетока газа

В состав устройства входят: пьезоэлектрический преобразователь для регистрации и преобразования акустического сигнала, возникающего при утечке газа, в электрический сигнал, предварительный усилитель, усиливающий преобразованный сигнал по напряжению, микроконтроллер семейства *STM32*, предназначенный для аналого-цифрового преобразования сигнала, его фильтрации от помех и дальнейшей обработки и анализа. Информация об обработанном сигнале и степени перетока выводится на дисплей, подключенный к микроконтроллеру. Питание предварительного усилителя, микроконтроллера и дисплея осуществляется от аккумуляторной батареи типа 18 650 с использованием *DC-DC* преобразователей и стабилизаторов напряжения.

Для обеспечения функционирования устройства необходим программный алгоритм, который должен быть загружен в память микроконтроллера. Согласно алгоритму, устройство должно

<sup>1</sup> СТО Газпром 031–2007. Методика проведения измерений объемов эмиссии метана в атмосферу на объектах ОАО «Газпром»: стандарт организации.

определять наличие либо отсутствие перетока в крановом узле ТПА, и при обнаружении такого вычислять его величину.

### Алгоритм определения величины перетока газа

Работа алгоритма разделена на два этапа. На первом этапе осуществляется серия из пяти измерений частотного спектра сигнала, поступающего на аналоговый вход контроллера. На втором этапе результаты измерений анализируются и определяется величина перетока газа. Блок-схема алгоритма определения величины перетока газа представлена на рис. 2.

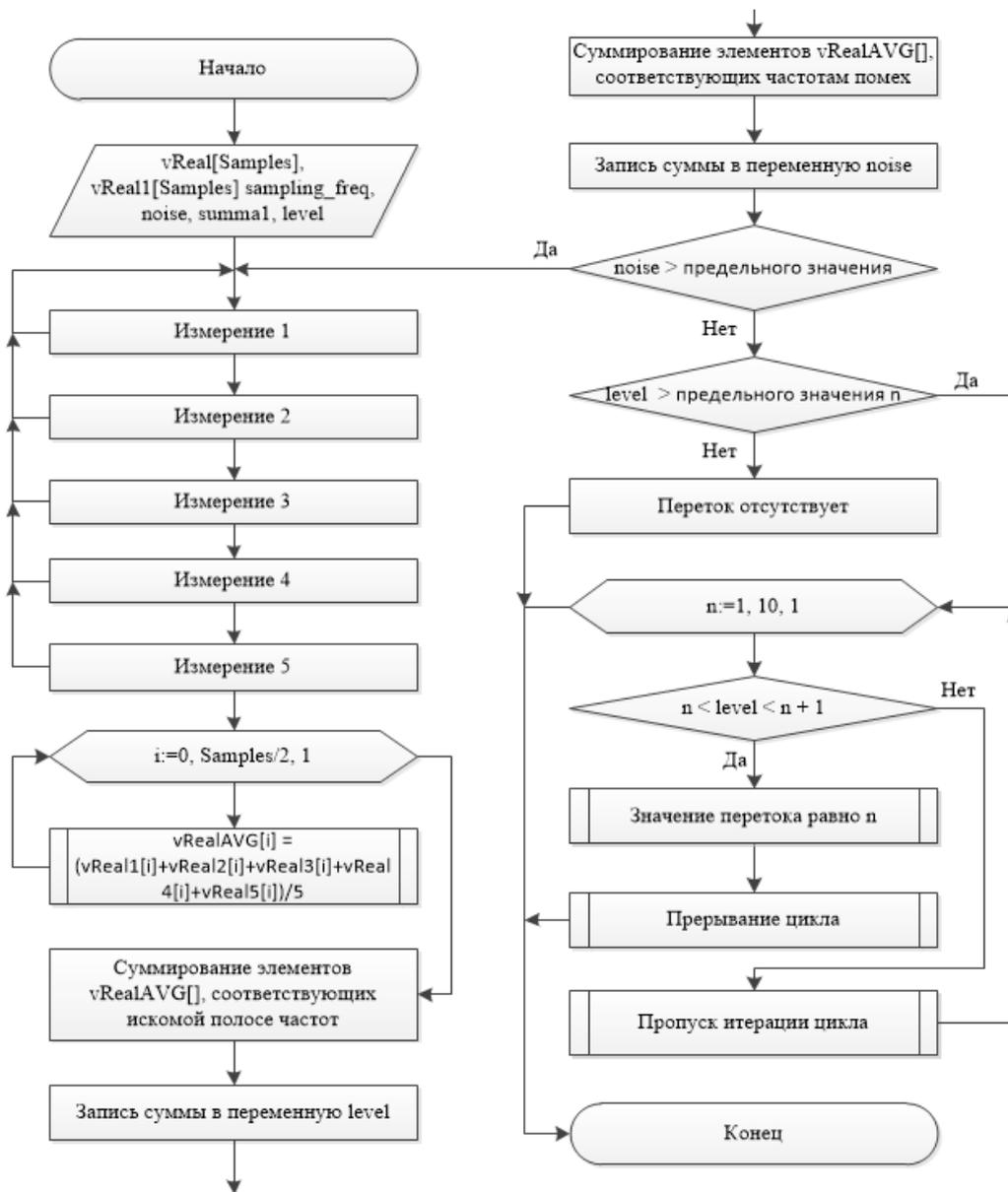


Рис. 2. Блок-схема алгоритма определения величины перетока газа

Работа алгоритма начинается с проведения серии из пяти измерений, результатом каждого из которых является массив данных, содержащий частотный спектр исследуемого акустического сигнала. Результаты всех измерений усредняются и записываются в массив  $vRealAVG$ . Далее элементы массива, соответствующие частотам помех, суммируются и записываются в переменную  $noise$ . Элементы массива, соответствующие искомой полосе частот сигнала перетока, суммируются и записываются в переменную  $level$ .

В конце выполнения алгоритма проверяется ряд условий. В случае, если переменная  $level$  превышает минимальное пороговое значение обнаружения перетока и одновременно с этим переменная

*noise* не превышает порогового значения сигнала помех, то делается вывод о том, что переток обнаружен. Последующая цепь условий определяет его степень (уровень), которая выражается в условных относительных единицах и определяется исходя из пределов, в которых лежит переменная *level*.

В случае, если переменная *level* не превышает минимальное пороговое значение обнаружения перетока, то делается вывод о том, что переток отсутствует. В случае, если переменная *noise* превышает пороговое значение, то выводится сообщение о превышении уровня помех и происходит возврат к началу работы программы.

Работа функции измерения сигнала акустической эмиссии и его обработки основана на математическом алгоритме быстрых преобразований Фурье (*fast Fourier transform, FFT*). Алгоритм *FFT* применяется для анализа сигналов и предназначен для преобразования данных об измеренном сигнале из временной области в частотную, разлагая их на составляющие. Алгоритм *FFT* позволяет сформировать массив данных, отражающий акустический спектр частот принимаемого сигнала утечки, который затем можно использовать для спектрального анализа сигнала. Входными данными для алгоритма *FFT* служат частота дискретизации сигнала, количество измерений сигнала за одну итерацию и массив величин напряжений сигнала, измеренных через промежуток времени, равный выбранному периоду дискретизации.

Алгоритм проведения измерения спектра сигнала акустической эмиссии представлен на рис. 3.

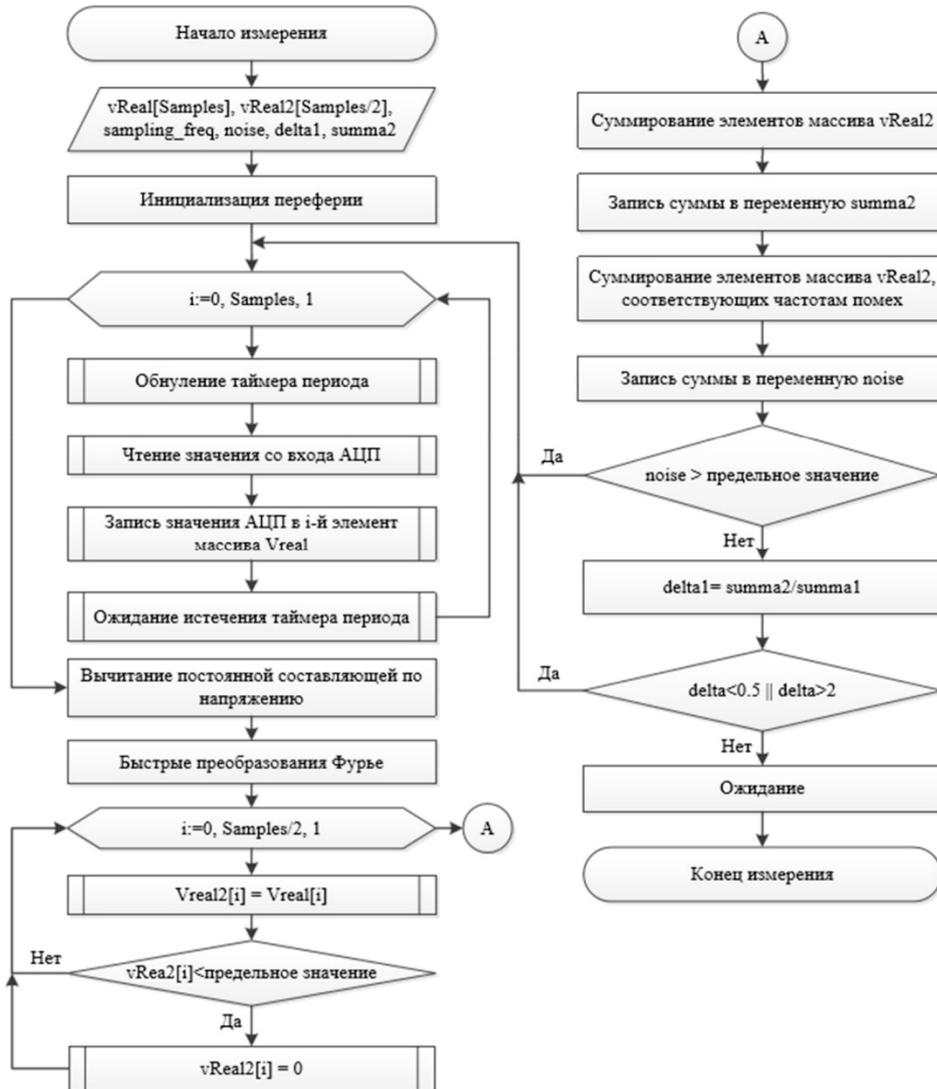


Рис. 3. Блок-схема алгоритма измерения спектра сигнала акустической эмиссии

Каждое из пяти измерений начинается с цикла чтения значений величин сигнала с АЦП микроконтроллера. Цикл наполняет массив *vReal*, количество значений в котором определяется переменной *samples*. Разница во времени между измерениями значений напряжения на входе АЦП равна периоду дискретизации сигнала – величине, обратной частоте дискретизации. Затем из значений наполненного

массива данных вычитается постоянная составляющая по напряжению, оставляя данные лишь о переменном сигнале, после чего массив данных преобразуется в акустический спектр с помощью алгоритма *FFT*. Таким образом, с увеличением порядкового номера элемента массива увеличивается частота, которой соответствует величина сигнала в этом элементе. Шаг частоты зависит от выбранного значения для переменной *samples*, т.е. от количества элементов в массиве. Шаг частоты  $\Delta$  определяется по следующей формуле:

$$\Delta = \frac{F_d}{n}, \quad (1)$$

где  $F_d$  – частота дискретизации сигнала;  $n$  – переменная *samples*, т.е. количество элементов в массиве.

После преобразования массива *vReal* в спектр создается новый массив *vReall*, в который записывается результат первого измерения (частотный спектр). Количество элементов данного массива в два раза меньше, чем в *vReal*, что объясняется тем, что в результате выполнения *FFT* приемлемым результатом является лишь первая половина массива. Поэтому верхний предел измеряемой частоты сигнала равен половине частоты дискретизации. Полученный массив фильтруется от помех, величина которых ниже некоторого предельного значения, устанавливаемого экспериментальным способом. Этот этап проводится с целью исключения их дальнейшего влияния на итоговый результат.

Затем все элементы массива суммируются и полученный результат записывается в соответствующую переменную *summa1*. Таким образом определяется общий уровень сигнала. Эта переменная потребуется в дальнейших измерениях.

Далее производится проверка на наличие в спектре сигнала посторонних частот (помех), которые в спектре сигнала утечки присутствовать не должны, а также искомого сигнала утечки. Эта операция осуществляется с учетом того, что частоты утечки и пороговое значение для помех известны заранее и получены экспериментально. Элементы массива, соответствующие частотам помех, суммируются и записываются в переменную *noise*. После этого проверяется условие, превышает ли переменная *noise* установленное пороговое значение. В случае превышения результаты измерения не учитываются, а выполнение алгоритма начинается заново. Если порог не превышен, выполнение алгоритма продолжается. Таким образом, в случае возникновения помех в спектре анализируемого сигнала измерения будут продолжаться до тех пор, пока их источник не будет устранен.

После проверки спектра сигнала на наличие в нем помех осуществляется поиск отношения сумм всех элементов массива (общего уровня сигнала, переменные *summa1–summa5*) текущего измерения и предыдущего (не производится для первого из пяти измерений, так как отсутствуют результаты предыдущего измерения). В случае отличия этих сумм в два раза и более выполнение алгоритма возвращается в начало. Это необходимо для того, чтобы установить, присутствует ли в акустическом сигнале постоянная во времени составляющая, источником которой является переток газа, а также для того, чтобы исключить влияние на итоговый результат сигнала непостоянных во времени помех, так как в случае наличия таковых итоговые суммы элементов массива будут значительно (более, чем в 2 раза) отличаться, и измерения начнутся заново. После каждого из пяти измерений устанавливается задержка, которая позволяет вести серию измерений на определенном промежутке времени, позволяя определить наличие или отсутствие постоянной составляющей сигнала утечки на некотором временном отрезке, а не в какой-то конкретный момент времени.

### Заключение

Таким образом, в статье предложена структурная схема устройства определения перетока газа в крановом узле ТПА, а также описан алгоритм его работы. Устройство предназначено для анализа акустических сигналов с целью определения возникновения нарушения герметичности кранового узла и степени перетока газа. Определение перетока на ранних стадиях позволяет вовремя провести профилактические мероприятия по его устранению, сохранить кран в рабочем состоянии и избежать экономических потерь, связанных с аварийно-восстановительными работами при ликвидации ЧС. Своевременное обнаружение утечек природного газа на шаровых кранах позволяет ускорить время оперативного реагирования аварийных служб [6]. Рассмотренный алгоритм обнаружения перетока газа может помочь в обеспечении стабильности работы и герметичности запорной арматуры магистральных газопроводов в течение всего срока службы. Поэтому использование предложенного алгоритма для диагностики состояния узлов трубопроводной арматуры во время проведения ее технического обслуживания позволит повысить безопасность и эффективность (в том числе экономическую) работы всей газотранспортной системы в целом.

## Список литературы

1. Уроки, извлеченные из аварий // Ростехнадзор. URL: <https://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/index.php> (дата обращения: 10.10.2024).
2. Yurkov N. K., Tankov G. V., Lysenko A. V., Trusov V. A. On the problem of experimental research of forced vibrations of plates // *Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016, (Saint-Petersburg, 25–27 May 2016)*. Saint-Petersburg : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016. P. 416–418. doi: 10.1109/SCM.2016.7519798 EDN: XFNVOX
3. Надырбеков Г. Ж., Григорьев А. В., Кочегаров И. И. [и др.]. Структурное описание размытия изображения круглой метки при возвратно-поступательном вибрационном перемещении исследуемой материальной точки // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. 2017. Т. 2. С. 11–13.
4. Grishko A. K., Kochegarov I. I., Lysenko A. V. [et al.] Determination of Electromagnetic Field Strength Taking into Account the Influence of Reflections // *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020 : proceedings (Moscow, 11–13 March 2020)*. Moscow, 2020. P. 9067494. doi: 10.1109/MWENT47943.2020.9067494 EDN: AYBROC
5. Короленок А. М., Тухбатуллин Ф. Г., Колотилов Ю. В. Обеспечение промышленной безопасности компрессорных станций путем диагностики негерметичности запорной арматуры // *Территория «НЕФТЕГАЗ»*. 2015. № 5. С. 68–71
6. Бояркин Д. С., Асеев Е. А., Голушко Д. А. [и др.]. Протокол регистрации технического обслуживания трубопроводной арматуры // *Надежность и качество сложных систем*. 2024. № 2. С. 95–102. doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-11

## References

1. Lessons learned from accidents. *Rostekhnadzor = Rostekhnadzor*. (In Russ.). Available at: <https://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/index.php> (accessed 10.10.2024).
2. Yurkov N.K., Tankov G.V., Lysenko A.V., Trusov V.A. On the problem of experimental research of forced vibrations of plates. *Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016, (Saint-Petersburg, 25–27 May 2016)*. Saint-Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016: 416–418. doi: 10.1109/SCM.2016.7519798 EDN: XFNVOX
3. Nadyrbekov G.Zh., Grigor'ev A.V., Kochegarov I.I. et al. Structural description of the blurring of the image of a circular mark during reciprocating vibration movement of the material point under study. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2017;2:11–13. (In Russ.)
4. Grishko A.K., Kochegarov I.I., Lysenko A.V. et al. Determination of Electromagnetic Field Strength Taking into Account the Influence of Reflections. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020: proceedings (Moscow, 11–13 March 2020)*. Moscow, 2020:9067494. doi: 10.1109/MWENT47943.2020.9067494 EDN: AYBROC
5. Korolenok A.M., Tuxhbatullin F.G., Kolotilov Yu.V. Ensuring industrial safety of compressor stations by diagnosing leakage of shut-off valves. *Territoriya «NEFTEGAZ» = The territory of NEFTEGAZ*. 2015;(5):68–71. (In Russ.)
6. Boyarkin D.S., Aseev E.A., Golushko D.A. et al. Protocol of registration of maintenance of pipeline fittings. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(2):95–102. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-11

## Информация об авторах / Information about the authors

**Дмитрий Сергеевич Бояркин**

техник-конструктор,  
 Научно-производственное  
 предприятие «Рубин»  
 (Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)  
 E-mail: boyarkyndmytry@gmail.com

**Виктор Дмитриевич Ежижанский**

инженер,  
 Научно-производственное  
 предприятие «Рубин»  
 (Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)  
 E-mail: vityastalkerxdxd@gmail.com

**Dmitry S. Boyarkin**

Technician designer,  
 Scientific and Production Enterprise "Rubin"  
 (2 Baidukova street, Penza, Russia)

**Viktor D. Yezhizhansky**

Engineer,  
 Scientific and Production Enterprise "Rubin"  
 (2 Baidukova street, Penza, Russia)

**Дмитрий Александрович Голушко**

кандидат технических наук, начальник отдела,  
Научно-производственное  
предприятие «Рубин»  
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)  
E-mail: dmitgoluschko@yandex.ru

**Ильдар Ринатович Абузяров**

начальник отделения,  
Научно-производственное  
предприятие «Рубин»  
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)  
E-mail: 0400@npp-rubin.ru

**Алексей Владимирович Лысенко**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: luysenko\_av@bk.ru

**Dmitry A. Golushko**

Candidate of technical sciences,  
head of department,  
Scientific and Production Enterprise "Rubin"  
(2 Baidukova street, Penza, Russia)

**Idar R. Abuzyarov**

Head of department,  
Scientific and Production Enterprise "Rubin"  
(2 Baidukova street, Penza, Russia)

**Aleksey V. Lysenko**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of radio equipment design and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 02.12.2024**

**Поступила после рецензирования / Revised 22.12.2024**

**Принята к публикации / Accepted 13.01.2025**