

ОБНАРУЖЕНИЕ НЕГЕРМЕТИЧНОСТИ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗА ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА СИГНАЛА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ УТЕЧКИ ГАЗА

Д. С. Бояркин¹, В. Д. Ежижанский², Д. А. Голушко³, А. Ю. Кирсанов⁴, А. В. Лысенко⁵

^{1, 2, 3, 4} Научно-производственное предприятие «Рубин», Пенза, Россия

⁵ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ boyarkyndmyrty@gmail.com, ² vityastalkerxdxd@gmail.com, ³ dmitgoluschko@yandex.ru,

⁴ malamash@yandex.ru, ⁵ lysenko_av@bk.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Длительная эксплуатация запорной арматуры магистральных газопроводов приводит к постепенному износу элементов уплотнения шаровых кранов и задвижек и нарушению их герметичности. Своевременное обнаружение нарушения герметичности запорной арматуры на ранней стадии позволяет сохранить оборудование в рабочем состоянии и избежать последствий, вызванных большими объемами утечек газа. Проведено исследование параметров сигнала акустической эмиссии утечки газа, результаты которого могут быть применены при практической реализации способов диагностики запорной арматуры для обнаружения утечки газа при нарушении ее герметичности. *Материалы и методы.* Проведено моделирование утечки газа через запорную арматуру на лабораторном стенде для имитации утечки. Приведены описание лабораторного стенда и структурная схема устройства для регистрации и анализа спектра сигнала акустической эмиссии утечки газа. *Результаты и выводы.* Представлены частотные спектры сигнала акустической эмиссии утечки газа, снятые на лабораторном стенде, при различных объемах утечки. Проанализированы результаты измерений, сделаны выводы о критериях определения нарушения герметичности запорной арматуры по частотному спектру сигнала акустической эмиссии утечки.

Ключевые слова: трубопроводная арматура, запорная арматура, шаровой кран, утечка газа, переток, техническое обслуживание, акустическая эмиссия

Для цитирования: Бояркин Д. С., Ежижанский В. Д., Голушко Д. А., Кирсанов А. Ю., Лысенко А. В. Обнаружение негерметичности запорной арматуры магистральных газопроводов с помощью анализа частотного спектра сигнала акустической эмиссии утечки газа // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 1. С. 95–102. doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-12

LEAK DETECTION OF SHUT-OFF VALVES OF MAIN GAS PIPELINES BY ANALYZING THE FREQUENCY SPECTRUM OF THE ACOUSTIC EMISSION SIGNAL ABOUT A GAS LEAK

D.S. Boyarkin¹, V.D. Yezhizhanskiy², D.A. Golushko³, A.Yu. Kirsanov⁴, A.V. Lysenko⁵

^{1, 2, 3, 4} Scientific and Production Enterprise "Rubin", Penza, Russia

⁵ Penza State University, Penza, Russia

¹ boyarkyndmyrty@gmail.com, ² vityastalkerxdxd@gmail.com, ³ dmitgoluschko@yandex.ru,

⁴ malamash@yandex.ru, ⁵ lysenko_av@bk.ru

Abstract. *Background.* Prolonged operation of shut-off valves of main gas pipelines leads to gradual wear of the sealing elements of ball valves and valves and a violation of their tightness. Timely detection of leakage of the shut-off valves at an early stage allows you to keep the equipment in working condition and avoid the consequences caused by large volumes of gas leaks. A study of the parameters of the acoustic emission signal of a gas leak has been conducted, the results of which can be applied in the practical implementation of methods for diagnosing shut-off valves to detect gas leaks in case of violation of its tightness. *Materials and methods.* A simulation of a gas leak through a shut-off valve on a laboratory bench was carried out to simulate a leak. A description of the laboratory stand and a block diagram of a device for recording and analyzing the spectrum of the acoustic emission signal of a gas leak are given. *Results and conclusions.* The frequency spectra of the acoustic emission signal of a gas leak, taken on a laboratory stand, at various leakage volumes are presented. The measurement results are analyzed, conclusions are drawn about the criteria for

determining the leakproofness of the shut-off valves according to the frequency spectrum of the acoustic emission signal of the leak.

Keywords: pipeline fittings, shut-off valves, ball valve, gas leak, overflow, maintenance, acoustic emission

For citation: Boyarkin D.S., Yezhizhanskiy V.D., Golushko D.A., Kirsanov A.Yu., Lysenko A.V. Leak detection of shut-off valves of main gas pipelines by analyzing the frequency spectrum of the acoustic emission signal about a gas leak. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* = *Reliability and quality of complex systems*. 2025;(1):95–102. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-12

Введение

В настоящее время добыча природного газа и его транспортировка выведены на уровень стратегически важных элементов экономики нашей страны. Магистральные газопроводы (МГ) и газопроводы распределительных сетей являются важнейшей частью энергетической инфраструктуры, которые обеспечивают природным газом населенные пункты и промышленные предприятия. В связи с высокими темпами развития газовой промышленности и ростом удельного веса природного газа, реализуемого на мировом и внутреннем российском рынках, наиболее актуальным является снижение удельных потерь природного газа (в том числе утечек метана), на газотранспортных объектах, возникающих в результате неисправностей оборудования. В числе неисправностей, вызывающих утечки газа, существенную роль играет негерметичность затвора запорной арматуры (ЗА) линейных участков МГ – шаровых кранов (ШК) и задвижек¹.

Герметичность ЗА необходимо контролировать ввиду постоянно происходящего износа как уплотнительных седел шарового крана, так и запорного элемента [1–4]. Износ происходит под действием силы трения, возникающей в пятнах контакта между поверхностью запорного элемента и уплотнительного седла. Также под влиянием транспортируемой среды повреждаются шлифованные поверхности запорного шара. Это связано с тем, что по ГОСТ 5542-2014 в природном газе допускается некоторая концентрация механических примесей².

При нарушении герметичности ШК или задвижки газ продолжает перетекать по затвору из одной отсекаемой части газопровода в другую – данное явление обозначается термином «переток». Помимо перетока, газ может уходить также через уплотнения шпинделя ЗА. В этом случае утечка газа происходит в окружающую среду, что при больших масштабах утечки приводит к образованию скоплений газа вокруг трубопровода, что является ЧС и требует немедленного выезда аварийной бригады для ликвидации течи.

Принятие мер по устранению неисправностей, вызывающих утечки газа (набивка уплотнительной пасты в затвор ШК, замена запорной арматуры), имеет смысл, если предварительно была проведена количественная оценка утечки газа через запорную арматуру, отражающая ее величину (объем). Это связано с тем, что в зависимости от диаметра и класса герметичности ЗА для нее устанавливается определенный допустимый объем утечек. Критерии оценки работоспособности ЗА, в том числе ее герметичности, регламентируются стандартом для трубопроводной арматуры ГОСТ 9544-2015³. Если при диагностике ШК или задвижки делается вывод о том, что для данного типа арматуры измеренный объем утечки не превышает установленный предел по герметичности, то меры по устранению течи принимать не требуется.

Акустическая эмиссия утечки

Переток газа через запорный орган шарового крана вызывает акустическую эмиссию утечки (АЭУ). В соответствии с ГОСТ Р 55045-2012 акустическая эмиссия утечки – это акустическая эмиссия (АЭ), вызванная гидродинамическими или аэродинамическими явлениями при протекании жидкости или газа через сквозную несплошность объекта⁴.

Акустические волны возникают вследствие увеличения скорости истечения воздушного потока через щель утечки ЗА. Отсутствие противодавления при движении газа по каналу утечки многократно увеличивает скорость потока, что в свою очередь приводит к изменению характера движения струи

¹ ГОСТ 24856–2014. Арматура трубопроводная. Термины и определения.

² ГОСТ 5542–2014. Газы горючие природные промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия.

³ ГОСТ 9544–2015. Арматура трубопроводная. Нормы герметичности затворов.

⁴ ГОСТ Р 55045–2012. Акустико-эмиссионная диагностика. Термины, определения и обозначения.

газа с ламинарного на турбулентный. Турбулентное движение газа сопровождается образованием вихрей и пульсаций потока, которые при контакте с металлом вызывают в нем вибрацию, которая и производит акустический сигнал.

АЭУ как физическая величина может быть зарегистрирована и преобразована в электрический сигнал для дальнейшей обработки и получения информации о степени утечки газа.

Таким образом, количественная оценка утечки может быть проведена путем измерения величины расхода газа с помощью акустико-эмиссионного контроля, который подразумевает регистрацию и анализ виброакустического сигнала, производимого потоком газа, истекающим через негерметичный ШК или задвижку.

Измерение спектра сигнала акустической эмиссии утечки

Турбулентный поток газа, возникающий в результате утечки через негерметичную ЗА, обуславливает появление звуковых сигналов в диапазоне частот 500–10 000 Гц и ультразвуковых сигналов в диапазоне частот 10...100 кГц [5].

Величина частотного диапазона сигнала АЭУ обратно пропорциональна размеру щели, через которую происходит утечка, и поэтому микроутечки обуславливают ультразвуковой диапазон сигнала АЭУ, а обычные утечки – звуковой диапазон. Экспериментально установлено, что утечки, представляющие реальную потерю газа, создают виброакустический сигнал в частотном диапазоне до 10 кГц. Более высокий частотный диапазон, от 10 до 100 кГц, может быть использован для диагностирования запорной арматуры на ранней стадии возникновения дефекта [5].

Преобразование сигнала АЭ в электрический сигнал, параметры которого используются для количественной и качественной оценки источника АЭ, осуществляется с помощью преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ). ПАЭ является важнейшим элементом прибора (системы) акустико-эмиссионного контроля. В зависимости от специфики задачи, параметров контролируемого объекта, типа источника АЭ, на практике могут применяться различные разновидности ПАЭ – конденсаторные, преобразователи на основе лазерных интерферометров, а также преобразователи, использующие пьезоэлектрические активные элементы [6].

Для диагностирования запорной арматуры трубопроводов применяются преимущественно пьезоэлектрические преобразователи. Основным элементом пьезоэлектрического ПАЭ является пьезоэлемент (пьезоэлектрический кристалл), преобразующий механическую вибрацию в электрический сигнал. Пьезоэлемент помещается в металлический корпус с плоским диэлектрическим доньшком и разъемом для выходного сигнала. При возникновении механической вибрации на поверхности, с которой контактирует датчик, он преобразует ее в электрический сигнал. Этот сигнал должен поступать на расположенный поблизости предварительный усилитель, после чего попадать на основную регистрирующую и обрабатывающую аппаратуру.

Стенд состоит из воздушного компрессора и пневматического ресивера модели Р5-125. На выходе ресивера установлен игольчатый клапан с отводом для регулирования расхода воздуха через клапан в атмосферу (имитация утечки).



Рис. 1. Стенд для имитации перетока

Для регистрации и измерения параметров сигнала АЭУ было собрано устройство, структурная схема которого представлена на рис. 2.

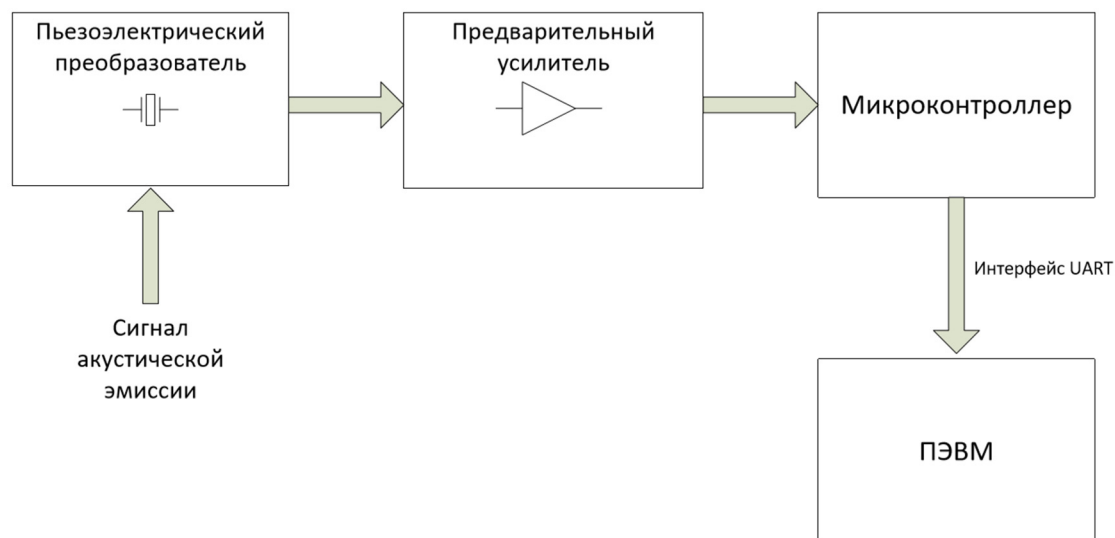


Рис. 2. Структурная схема устройства для регистрации и обработки сигнала АЭУ

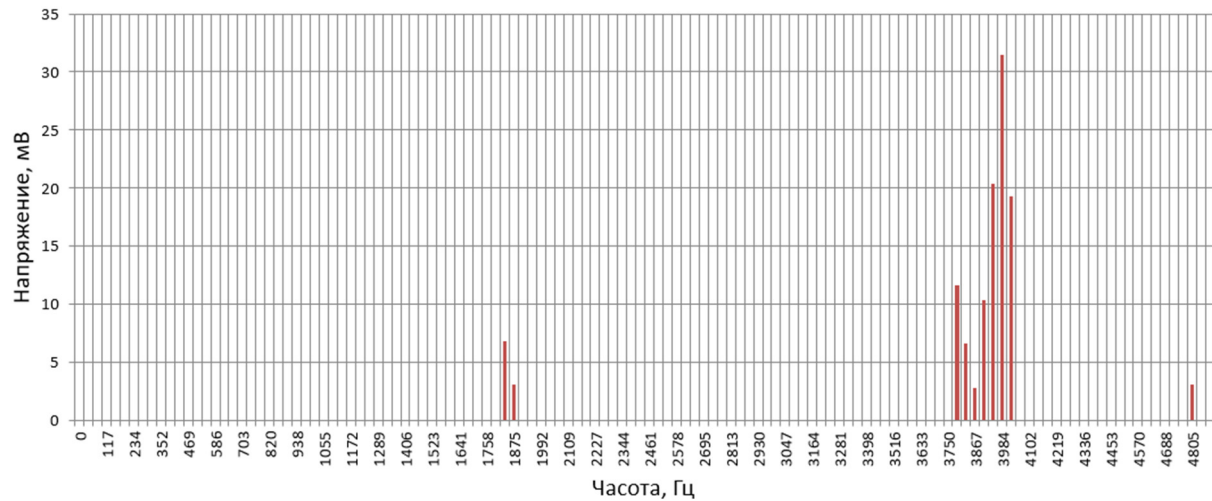
Устройство для регистрации и обработки сигнала АЭУ состоит из пьезоэлектрического датчика АЭ, двухкаскадного предварительного усилителя, выполненного на микросхеме операционного усилителя TL072, и микроконтроллера STM32F103C8T6. Микроконтроллер предназначен для регистрации, аналого-цифрового преобразования, фильтрации от помех сигнала АЭУ, а также его преобразования в частотный спектр и вывода полученной информации на ПЭВМ по интерфейсу UART через преобразователь интерфейсов UART-USB.

Разложение сигнала АЭУ на частотный спектр производится с помощью математического алгоритма быстрых преобразований Фурье (БПФ). Алгоритм БПФ применяется для анализа сигналов и предназначен для преобразования данных об измеренном сигнале из временной области в частотную, разлагая их на составляющие. Алгоритм БПФ позволяет сформировать массив данных, отражающий акустический спектр частот принимаемого сигнала утечки, который затем можно использовать для спектрального анализа сигнала. Входными данными для алгоритма БПФ служат частота дискретизации сигнала, количество измерений сигнала за одну итерацию и массив величин напряжений сигнала, измеренных через промежуток времени, равный выбранному периоду дискретизации. Для измерений использовались следующие параметры обработки сигнала АЭУ: частота дискретизации: 10 кГц; количество измерений сигнала за одну итерацию: 256. С учетом выбранной частоты дискретизации, согласно теореме Котельникова, максимальная частота оцифровываемого сигнала АЭУ составляет 5 кГц. Все измерения сигналов АЭУ проводились в диапазоне до 5 кГц.

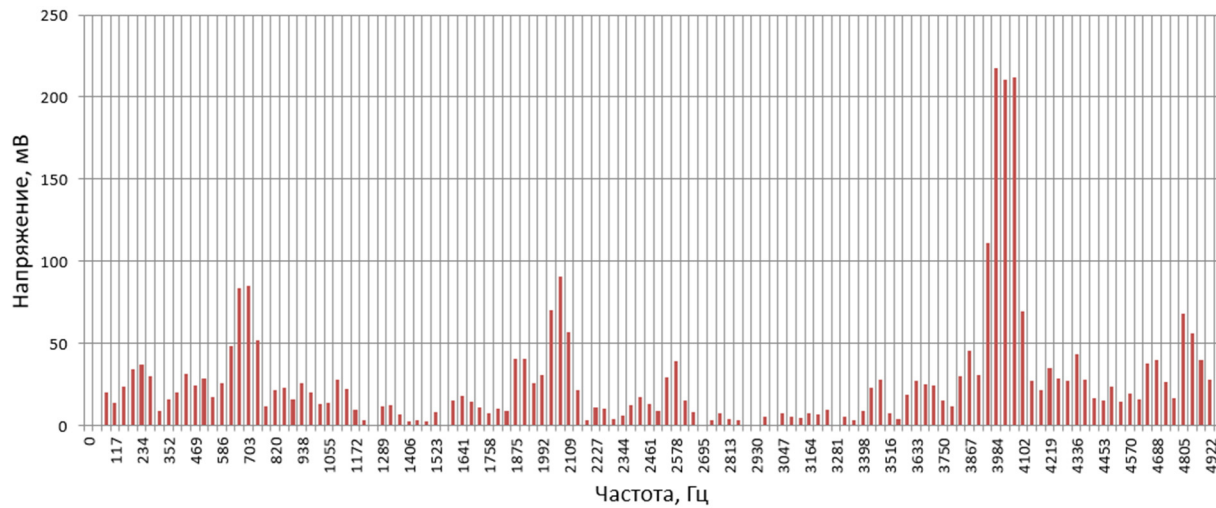
Измерения параметров сигнала АЭУ на лабораторном стенде проводились следующим образом:

- 1) на пневматический ресивер модели P5-125 устанавливается датчик преобразователя акустической эмиссии;
- 2) в ресивер подается воздух от компрессора под давлением не более 0,8 МПа;
- 3) фиксируются начальные показания амплитуды сигнала при отсутствии утечки для калибровки нижнего порога уровня шумов;
- 4) путем постепенного отворачивания регулирующей иглы из седла запорного дросселя устанавливается требуемый расход воздуха через дроссель в атмосферу (объем имитируемой утечки);
- 5) фиксируется спектр сигнала АЭУ.

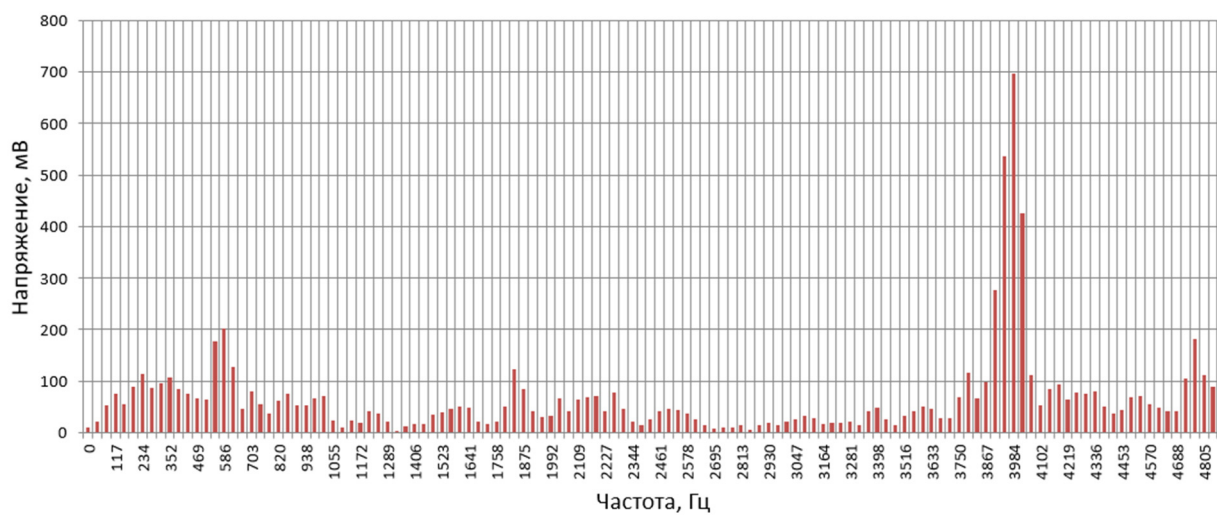
Измерения сигнала АЭУ на рассматриваемом стенде проводились при трех степенях утечки, ее величина регулировалась путем постепенного отворачивания регулирующей иглы запорного клапана. Спектр сигнала АЭУ при минимальном, среднем и максимальном откручивании иглы представлен на рис. 3.



а)



б)



в)

Рис. 3. Спектр сигнала АЭУ:

а – при минимальном откручивании иглы; б – среднем откручивании иглы;
в – максимальном откручивании иглы

Из спектрограмм видно, что при всех трех степенях утечки в частотном спектре сигнала АЭУ преобладающей является узкая полоса частот в диапазоне от 3750 до 4100 Гц. При увеличении степени утечки путем откручивания иглы запорного клапана амплитуды частот в этой полосе пропорционально возрастают. При изменении величины утечки в спектре могут проявляться дополнительные полосы частот в диапазонах 550–800 Гц и 1800–2200 Гц, амплитуды частот в которых также возрастают при увеличении объема утечки, что отображено на рис. 3,б,в. Однако полоса 3750–4100 Гц присутствует в спектре сигнала АЭУ вне зависимости от объема утечки.

Из этого можно сделать вывод, что для обнаружения утечки в крановом узле и определения ее величины необходимо зарегистрировать сигнал АЭУ и перевести его из временной области в частотную, после чего проанализировать полученный частотный спектр.

Для каждого конкретного ШК или задвижки, в зависимости от диаметра и класса герметичности, возможно экспериментально определить искомую полосу частот и порог по амплитуде сигнала АЭУ, который должен соответствовать предельному допустимому объему утечек газа для рассматриваемого образца запорной арматуры. При проведении диагностики ЗА акустико-эмиссионным контролем и обнаружении сигнала АЭУ, амплитуда которого превышает установленный порог сигнала АЭУ в заданной полосе частот, можно заключить, что допустимый для данного образца запорной арматуры объем утечек превышен и есть нужда в техническом обслуживании [7].

Заключение

Таким образом, в статье описано применение акустико-эмиссионного контроля для определения степени герметичности ЗА путем анализа частотного спектра сигнала акустической эмиссии утечки газа. Был исследован спектр сигнала АЭУ, полученного на лабораторном стенде для имитации перетока, приведена структурная схема устройства для регистрации, преобразования и анализа сигнала АЭУ. Приведены спектрограммы исследуемых сигналов АЭУ, снятых со стенда, определены преобладающие частоты и их амплитуды, указано на пропорциональную зависимость амплитуды сигнала АЭУ от объема утечки. Сделано заключение о том, как по снятым параметрам сигнала АЭУ определить наличие или отсутствие нарушения герметичности ШК или задвижки. Приведенные результаты позволяют использовать их в практической реализации способов технической диагностики запорной арматуры для обнаружения превышения допустимого объема утечек в ЗА. Своевременное обнаружение утечек газа через негерметичную ЗА позволяет вовремя провести техническое обслуживание и сохранить оборудование в исправном состоянии, тем самым избежать серьезных экономических и экологических последствий.

Список литературы

1. Юрков Н. К., Затылкин А. В., Полесский С. Н. [и др.]. Методы повышения точности прогнозирования показателей надежности наукоемких сложных электронных систем // Современные информационные технологии. 2014. № 19. С. 183–187. EDN: SLSGFL
2. Yurkov N. K., Trusov V. A., Lysenko A. V. Methods of Providing Reliability of Avionics and Aerospace Equipment at the Design Stage // 13th international scientific and technical conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE-2016) : proceedings : in 12 volumes (Novosibirsk, 3–6 October 2016). Novosibirsk : Novosibirsk State Technical University, 2016. Vol. 1, part 2. P. 123–127. doi: 10.1109/APEIE.2016.7806427 EDN: WZWMUD
3. Grishko A., Lysenko A., Yurkov N. [et al.]. Stochastic Model of Parametric Prediction of Reliability of Radio-Electronic Systems // Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT 2019) : proceedings (Yekaterinburg, 25–26 April 2019). Yekaterinburg : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019. P. 432–435. doi: 10.1109/USBEREIT.2019.8736570 EDN: MUDDKI
4. Голушко Д. А., Лысенко А. В., Калаев М. П. Цифровой генератор прямого синтеза для формирования многоканального испытательного сигнала с плавающей частотой // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 4. С. 73–78. EDN: VMIZDP
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. Требования к преобразователям акустической эмиссии, применяемым для контроля опасных производственных объектов. РД 03-300-99 : утвержден постановлением Госгортехнадзора России от 15 июля 1999 г. № 53 : дата введения 1999-01-10. М. : ПИО ОБТ, 2002. 33 с.
7. Штыков Р. А., Юрков Н. К. Оптимизация управления транспортировкой газа по трубопроводам путем анализа динамики изменения концентрации примесей // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3. С. 87–92. doi: 10.21685/2307-4205-2021-3-11

References

1. Yurkov N.K., Zatylnik A.V., Polesskiy S.N. et al. Methods for improving the accuracy of forecasting reliability indicators of high-tech complex electronic systems. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii = Modern information technologies*. 2014;(19):183–187. (In Russ.). EDN: SLSGFL
2. Yurkov N.K., Trusov V.A., Lysenko A.V. Methods of Providing Reliability of Avionics and Aerospace Equipment at the Design Stage. *13th international scientific technical conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE-2016): proceedings: in 12 volumes (Novosibirsk, 3–6 October 2016)*. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2016;1(Pt.2):123–127. doi: 10.1109/APEIE.2016.7806427 EDN: WZWMUD
3. Grishko A., Lysenko A., Yurkov N. et al. Stochastic Model of Parametric Prediction of Reliability of Radio-Electronic Systems. *Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT 2019): proceedings (Yekaterinburg, 25–26 April 2019)*. Yekaterinburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019:432–435. doi: 10.1109/USBEREIT.2019.8736570 EDN: MUDDKI
4. Golushko D.A., Lysenko A.V., Kalaev M.P. Digital direct synthesis generator for the formation of a multichannel test signal with a floating frequency. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(4):73–78. (In Russ.). EDN: VMIZDP
5. Korolenok A.M., Tukhatullin 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. Requirements for acoustic emission transducers used for monitoring hazardous production facilities. *RD 03-300-99: utverzhden postanovleniem Gosortekhnadzora Rossii ot 15 iyulya 1999 g. № 53: data vvedeniya 1999-01-10 = RD 03-300-99: approved by Resolution No. 53 of Gosortekhnadzor of Russia dated July 15, 1999: date of introduction 1999-01-10*. Moscow: PIO OBT, 2002:33. (In Russ.)
7. Shtykov R.A., Yurkov N.K. Optimization of gas transportation control through pipelines by analyzing the dynamics of changes in the concentration of impurities. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(3):87–92. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2021-3-11

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

Дмитрий Александрович Голушко

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

Александр Юрьевич Кирсанов

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

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)

Dmitry A. Golushko

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

Aleksandr Yu. Kirsanov

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

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

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 14.12.2024

Поступила после рецензирования/Revised 25.12.2024

Принята к публикации/Accepted 16.01.2025