

УДК 620.179.17:621.643.03
EDN: DYBKXX

А.В. Яковлев, С.А. Карлов
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ КАЭМС

Объект и цель научной работы. Объектом исследования являются волновые формы (осциллограммы) акустических импульсов, регистрируемые аппаратурой системы акустико-эмиссионной диагностики КАЭМС. Цель – разработка алгоритма распознавания волновых форм импульсов для фильтрации сигналов помех сложной формы.

Материалы и методы. Для распознавания импульсов используются метод глубокого обучения (deep learning, DL) и данные, полученные в экспериментальной работе с пневмоиспытаниями натуральных трубопроводов.

Основные результаты. Предложен параметр DL, характеризующий степень схожести осциллограммы импульса на типичную для сигнала акустической эмиссии. Для полезных сигналов этот параметр близок к 100 %, а для различных сигналов помех стремится к 0 %.

Заключение. Представлена актуальная версия алгоритма распознавания волновых форм импульсов методом глубокого обучения, используемая в программном обеспечении системы акустико-эмиссионной диагностики КАЭМС. Приведены результаты применения этого алгоритма при диагностике трубопроводных систем.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, цифровая обработка сигналов, глубокое обучение.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 620.179.17:621.643.03
EDN: DYBKXX

A.V. Yakovlev, S.A. Karlov
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

DEEP-LEARNING ALGORITHMS IN KAEMS SYSTEM FOR ACOUSTIC-EMISSION MONITORING

Object and purpose of research. This paper discusses waveforms (oscillograms) of acoustic pulses recorded by KAEMS acoustic-emission monitoring system. The purpose of the study was to develop a pulse waveform recognition algorithm that would be able to filter interference signals of complex shape.

Materials and methods. Pulse recognition is performed as per deep learning (DL) method based on pneumatic test results for full-scale pipelines.

Main results. The authors suggest DL parameter characterizing the extent of similarity between the waveform of the target pulse and the typical waveform of acoustic-emission signal. The value of this parameter for useful signals is close to 100%, and for various interference signals it tends to 0%.

Conclusion. This paper presents the latest version of DL-based waveform recognition algorithm implemented in KAEMS acoustic-emission monitoring system, as well as performance of this algorithm in the diagnostics of piping systems.

Keywords: acoustic emission, digital signal processing, deep learning.

The authors declare no conflicts of interest.

Для цитирования: Яковлев А.В., Карлов С.А. Применение алгоритмов глубокого обучения в системе акустико-эмиссионной диагностики КАЭМС. Труды Крыловского государственного научного центра. 2026; 1(415): 78–82.

For citations: Yakovlev A.V., Karlov S.A. Deep-learning algorithms in KAEMS system for acoustic-emission monitoring. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2026; 1(415): 78–82 (in Russian).

Введение

Introduction

Метод акустико-эмиссионной (АЭ) диагностики использует явление акустической эмиссии – излучение ультразвуковых импульсов в результате быстрых структурных изменений в локальных областях твердого тела при его деформировании. Высокая чувствительность этого метода гарантирует обнаружение сигналов от активных дефектов и микродефектов материала, но затрудняет их выявление на фоне сопутствующих потоков разнообразных ультразвуковых помех, особенно значительных при АЭ диагностике в промышленных условиях.

Современные системы АЭ-диагностики, такие как КАЭМС и СЦАД, способны регистрировать волновые формы принимаемых широкополосных импульсов и выполнять их цифровую обработку [1–3], что предоставляет широкие возможности для отбраковки импульсов помех по различным параметрам их формы и спектрального состава. В частности, в работе [4] показано, что алгоритм оценки обобщенной степени опасности акустических импульсов АЭ, вычисляемый по методу нечеткой логики, позволяет эффективно отбраковывать импульсы механических помех при испытаниях натуральных объектов.

Однако поскольку обобщенная степень опасности является характеристикой акустического импульса, показывающей степень его приближения к высокоамплитудному, дискретному и высокочастотному импульсу (параметр D), то этот алгоритм может ошибочно относить высокоамплитудные электромагнитные (ЭМ) помехи к сигналам АЭ-природы. Разумеется, потоки механических помех (трение, удары, утечки) намного превосходят по активности наблюдаемые ЭМ помехи. Поэтому в системе КАЭМС отбраковка ЭМ выполняется после отбраковки механических помех по параметру D .

На рис. 1 (см. вклейку) показаны волновая форма и спектр типичного импульса АЭ, зарегистрированного от дефекта в сварном шве трубопроводной системы. Видно, что параметр D (опасность) такого импульса имеет максимальное значение 1000 у.е.

На рис. 2 (см. вклейку) показаны волновая форма и спектр типичного импульса ЭМ помехи, зарегистрированного при испытаниях трубопроводной системы. Видно, что параметр D (опасность) такого импульса тоже имеет высокое значение – 566 у.е. Отбраковать подобные импульсы позволяет классическая схема фильтрации сигналов по совокупности параметров амплитуды и длительности (или числа осцилляций), т.к. типичные ЭМ

помехи имеют намного меньшую протяженность по сравнению с полезным АЭ сигналом.

Однако в промышленных условиях встречаются импульсы ЭМ помех, имеющие нетипичные волновые формы. Пример такого импульса приведен на рис. 3 (см. вклейку). Видно, что подобные импульсы имеют высокие значения параметра D , при этом могут иметь длительности, сопоставимые с импульсами АЭ, что затрудняет их отбраковку по совокупности параметров «амплитуда – длительность».

В системе КАЭМС для фильтрации подобных импульсов помех со сложной волновой формой используется дополнительный параметр DL импульса. Как и параметр D , он характеризует степень схожести импульса на типичный импульс АЭ, но формируется путем оценки волновой формы импульса в сверточной нейронной сети, обученной распознаванию волновых форм, типичных для АЭ и помех разной природы на конкретном объекте контроля. Этот параметр измеряется в % в диапазоне от 0 (помеха) до 100 (импульс АЭ).

Следует отметить, что алгоритм DL был обучен на данных экспериментальной работы с пневмоиспытаниями натуральных трубопроводов [5, 6]. В качестве положительных примеров сигналов использовались сигналы от дефектов, внесенных в сварной шов за счет нарушения технологии сварки. Успешность внесения дефектов подтверждена радиографическим контролем. Для ЭМ помех, зарегистрированных в реальных заводских условиях, эффективность фильтрации составила 99,8 % [7].

Применяя модель сверточной нейронной сети, которую обучили распознавать волновые формы, типичные для пневмоиспытаний трубопроводных систем, к сигналам, показанным на рис. 1–3, получим следующие значения DL :

- для типичного импульса АЭ (рис. 1) данный параметр составляет 97 %;
- для классической ЭМ помехи (рис. 2) – 0 %;
- для нестандартной ЭМ помехи (рис. 3) – также 0 %.

Алгоритм вычисления параметра DL волновой формы импульса

Calculation algorithm for DL parameter of pulse waveform

Параметр DL акустического импульса в АЭ-системе КАЭМС вычисляется с использованием следующих этапов обработки:

1. исходный сигнал – волновая форма импульса на интервале 0–160 мкс;

2. формирование спектрограммы сигнала с 36 частотными и 41 временными составляющими методом оконного преобразования Фурье с использованием оконной функции Ханна (Хеннинга) [8] и пакетной нормализации по оси частот в децибельной шкале;
3. оценка спектрограммы сигнала сверточной нейронной сетью с открытой архитектурой ResNet(x1.0) [9], предварительно обученной на наборе ImageNet [10], с укороченной до 11 блоков сверточной основой, финальной сверткой по всей оси частот, глобальным максимальным пулингом и выходным вектором признаков размерностью 256, который подается на полносвязный слой с сигмоидальной функцией активации для получения итоговой вероятности.

Модель обработки реализована на языке программирования Python в открытом фреймворке PyTorch [11] и используется в ПО КАЭМС с помощью библиотеки Libtorch на языке C++. Волновые формы импульсов для выполнения оценки загружаются в тензор размерностью $320 \times N$, где N – число одновременно оцениваемых сигналов.

Быстродействие алгоритма вычисления параметра DL оценивалось многократной обработкой исходного сигнала на современном ПК средней мощности, имеющем следующие характеристики: процессор (CPU) AMD Ryzen 5, 16 ГБ ОЗУ, графический процессор (GPU) NVIDIA T400 4Gb. В табл. 1 показано быстродействие алгоритма в зависимости от типа вычислителя (CPU или GPU) и размерности тензора, содержащего исходные волновые формы.

Видно, что скорость вычисления параметра DL варьируется от нескольких сотен до тысяч импульсов в секунду и максимальное быстродействие достигается при одновременной обработке 100 и более импульсов.

В ПО КАЭМС анализ данных с использованием параметра DL реализован в виде отдельного при-

ложения – дополнения к основной программе анализа, работающего параллельно с ней. Причем основная программа передает дополнению пакеты акустических событий, накопленных за заданный интервал времени. Такая организация анализа данных позволяет использовать алгоритм DL с максимальной эффективностью.

Практическое применение алгоритма глубокого обучения при пневматических испытаниях трубопровода

Practical implementation of DL algorithm in pneumatic tests of pipeline

В качестве примера использования предложенного выше алгоритма оценки волновых форм импульсов по параметру DL рассмотрим результаты анализа сигналов ЭМ помех, зарегистрированных при проведении пневматических испытаний трубопроводной системы по методике [6], когда более 200 сигналов ЭМ помех различной формы было выделено в отдельные файлы данных с целью их детального анализа.

На рис. 4 (см. вклейку) приведено распределение этих сигналов по параметрам «амплитуда – длительность» с цветовой градацией опасности (параметр D). Видно, что сигналы ЭМ помех имеют амплитуды от 55 дБ (порог регистрации) до 96 дБ, длительности от 0 до 200 мкс и высокие показатели опасности, что затрудняет их фильтрацию как традиционными методами, так и по параметру D.

На рис. 5 (см. вклейку) показана гистограмма распределения этих сигналов по параметру DL. Видно, что практически все импульсы ЭМ помех, даже имеющие сложные волновые формы, находятся в диапазоне параметра DL < 2 % и только один сигнал имеет параметр DL порядка 40 %. Очевидно, что фильтрация по признаку «параметр DL > 50 %» удаляет все сигналы рассматриваемых ЭМ помех.

Таблица 1. Скорость оценки волновой формы акустического импульса по параметру DL (сигн./с)

Table 1. Speed of acoustic pulse waveform assessment by DL parameter (signals per second)

Число сигналов в пакете	Процессор CPU	Процессор GPU
2	140	250
8	480	1000
32	960	2600
128	1200	4000
256	1200	4500

Таким образом, фильтрация акустических сигналов по параметру DL повышает достоверность их классификации как сигналов АЭ, типичных для конкретных условий и объекта АЭК.

Заключение

Conclusion

Подробно изложен алгоритм оценки волновой формы акустических импульсов методом глубокого обучения, реализованный в программном обеспечении акустико-эмиссионной системы КАЭМС.

Приведены результаты практического использования этого алгоритма при обработке АЭ-данных, зарегистрированных при пневматических испытаниях трубопроводной системы. Показано, что фильтрация акустических сигналов по параметру DL повышает вероятность корректной классификации источников АЭ.

Список использованной литературы

1. Многоканальная многофункциональная акустико-эмиссионная система диагностики состояний конструкций и сооружений / В.А. Гуменюк, А.В. Яковлев, В.А. Сульженко, Ю.Г. Иванов // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 1997. Вып. 5(289). С. 78–83.
2. Яковлев А.В., Соснин В.А. Цифровая обработка акустических импульсов в системе акустико-эмиссионной диагностики КАЭМС // Техническая акустика. 2018. С. 3 (с. 1–14). URL: <https://ejta.org/archive/articles2018/iakovlev1.pdf> (дата обращения: 25.12.2025).
3. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И. Акустико-эмиссионная система для регистрации непрерывных и дискретных сигналов // Датчики и системы. 2010. № 8. С. 55–59.
4. Яковлев А.В., Балдычев С.В. Алгоритм нечеткой логики в системе акустико-эмиссионной диагностики КАЭМС // Техническая акустика. 2024. С. 3 (с. 1–7). URL: <https://ejta.org/archive/articles2024/iakovlev2.pdf> (дата обращения: 25.12.2025).
5. Карлов С.А. Применение алгоритмов глубокого обучения для распознавания сигналов акустической эмиссии // Всероссийская молодежная конференция «Научно-технологическое развитие судостроения – 2021»: тезисы докладов. Санкт-Петербург: Крыловский гос. науч. центр, 2021. С. 23–24.
6. РД ИМЯН.219–2009. Монтажные сварные соединения. Трубопроводы воздушных и газовых систем изделий: 21. Акустико-эмиссионный контроль. Методика. Санкт-Петербург: Крыловский гос. науч. центр, 2009. 23 с.
7. Карлов С.А. Применение алгоритмов машинного обучения для фильтрации сигналов помех при акустико-

эмиссионном контроле // Тезисы X Всероссийской конференции с международным участием «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии» (АПМАЭ-2024). Самара, 2024. С. 90–91. URL: <https://apmae.ru/materials/Сборник докладов АПМАЭ-2024.pdf> (дата обращения: 25.12.2025).

8. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов. Москва: Бином, 2006. 652 с.
9. Rethinking channel dimensions for efficient model design / D. Han, S. Yun, B. Heo, Y. Yoo // 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Nashville, 2021. P. 732–741. DOI: 10.1109/CVPR46437.2021.00079.
10. ImageNet large scale visual recognition challenge / O. Russakovsky, J. Deng, H. Su [et al.] // International journal of computer vision. 2015. Vol. 115. P. 211–252. DOI: 10.1007/s11263-015-0816-y.
11. PyTorch: an imperative style, high-performance deep learning library / A. Paszke [et. al.] // Advances in Neural Information Processing Systems. 2019. Vol. 32: 33rd Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2019). P. 8024–8035.

References

1. Multi-channel universal acoustic-emission system for technical diagnostics of structures / V.A. Gumenyuk, A.V. Yakovlev, V.A. Sulzhenko, Yu. Ivanov // Transactions of Krylov Central Research Institute. 1997. Vol. 5(289). P. 78–83 (in Russian).
2. Yakovlev A.V., Sosnin V.A. Digital processing of acoustic pulses in KAEMS acoustic-emission monitoring system // Technical Acoustics. 2018. Vol. 3. P. 1–14. URL: <https://ejta.org/archive/articles2018/iakovlev1.pdf> (Accessed: 25.12.2025) (in Russian).
3. Seryeznov A.N., Stepanova L.N., Kabanov S.I. Acoustic-emission system for recording continuous and discrete signals // Sensors & Systems. 2010. Vol. 8. P. 55–59 (in Russian).
4. Yakovlev A.V., Baldychev S.V. Fuzzy-logic algorithm in KAEMS acoustic-emission monitoring system // Technical Acoustics. 2024. Vol. 3. P. 1–7. URL: <https://ejta.org/archive/articles2024/iakovlev2.pdf> (Accessed: 25.12.2025) (in Russian).
5. Karlov S.A. Deep-learning algorithms for recognition of acoustic emission signals // All-Russian Youth Conference “Research & Engineering Advances in Shipbuilding 2021”. Compendium of papers. St. Petersburg: Krylov State Research Centre, 2021. P. 23–24 (in Russian).
6. Document РД ИМЯН.219–2009. Welded joints. Pipelines of air and gas transfer systems: 21. Acoustic emis-

- sion monitoring. Procedure. St. Petersburg : Krylov State Research Centre, 2009. 23 p. (*in Russian*).
7. *Karlov S.A.* Machine-learning algorithms for interference signal filtering in acoustic-emission monitoring // Theses of 10th All-Russian conference with international participation “Relevant Challenges in Acoustic Emission Method (APMAE-2024)”. Compendium of papers. Samara, 2024. P. 90–91. URL: <https://apmae.ru/materials/Сборник докладов АПМАЭ-2024.pdf> (Accessed: 25.12.2025) (*in Russian*).
 8. *Lyons R.* Understanding digital signal processing (*Russian translation*). Moscow : Binom, 2006. 652 p.
 9. Rethinking channel dimensions for efficient model design / *D. Han, S. Yun, B. Heo, Y. Yoo* // 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Nashville, 2021. P. 732–741. DOI: 10.1109/CVPR46437.2021.00079.
 10. ImageNet large scale visual recognition challenge / *O. Russakovsky, J. Deng, H. Su* [et al.] // International journal of computer vision. 2015. Vol. 115. P. 211–252. DOI: 10.1007/s11263-015-0816-y.
 11. PyTorch: an imperative style, high-performance deep learning library / *A. Paszke* [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems. 2019. Vol. 32: 33rd

Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2019). P. 8024–8035.

Сведения об авторах

Яковлев Александр Викторович, старший научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-47-58. E-mail: versy59@yandex.ru.

Карлов Сергей Анатольевич, инженер 1-й категории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-47-58. E-mail: aepro1988@mail.com.

About the authors

Alexander V. Yakovlev, Senior Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-47-58. E-mail: versy59@yandex.ru.

Sergey A. Karlov, 1st Category Engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-47-58. E-mail: aepro1988@mail.com.

Поступила / Received: 20.11.25
Принята в печать / Accepted: 18.02.26
© Яковлев А.В., Карлов С.А., 2026

Рис. 1. Типичный импульс акустической эмиссии от дефекта
Fig. 1. Typical waveform of defect

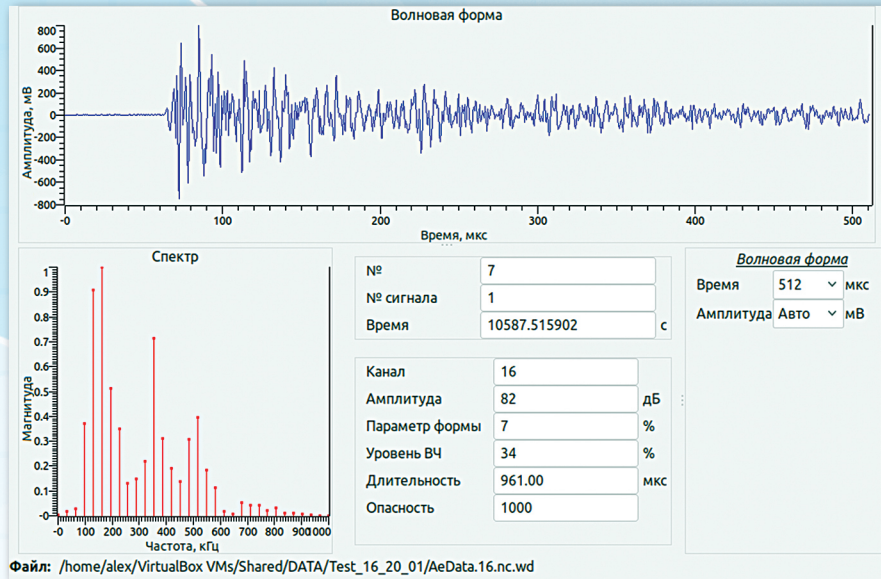


Рис. 2. Типичный импульс электромагнитной помехи
Fig. 2. Typical waveform of electromagnetic interference

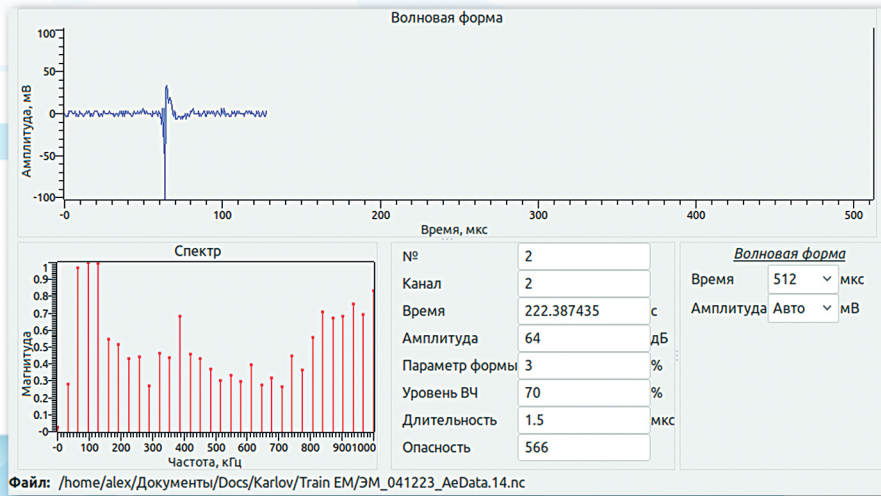
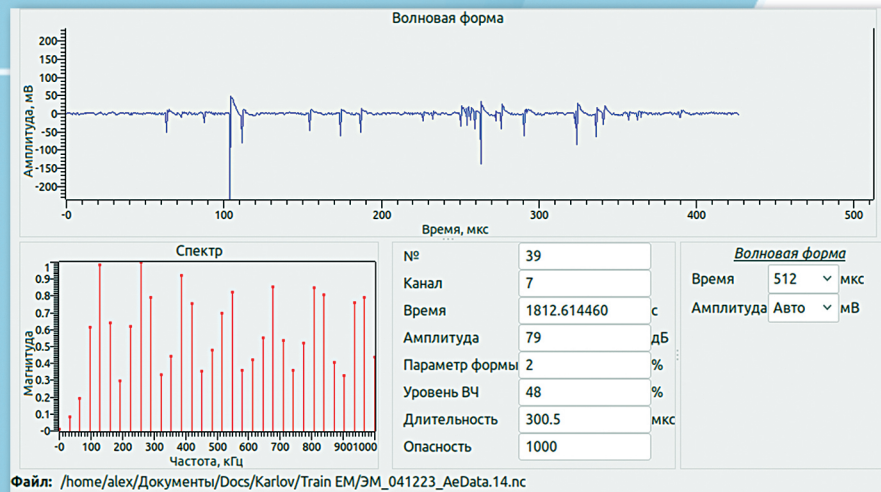


Рис. 3. Импульс электромагнитной помехи сложной формы
Fig. 3. Electromagnetic interference of complex shape



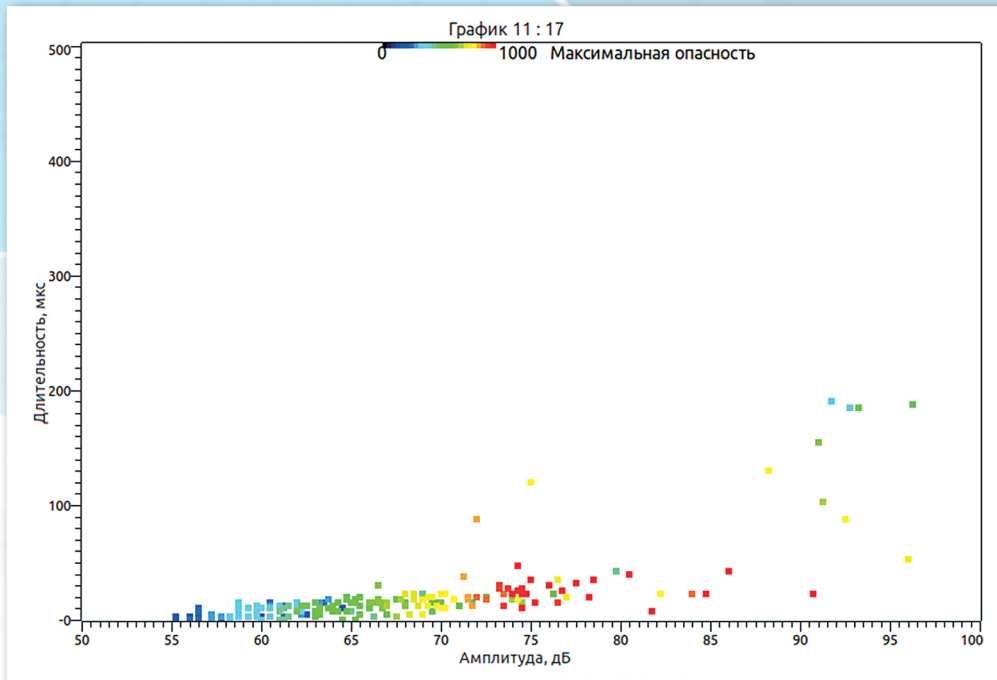


Рис. 4. Распределение сигналов электромагнитных помех по параметрам «амплитуда – длительность» с цветовой градацией опасности

Fig. 4. Distribution of electromagnetic interference signals by parameters "amplitude – duration". Color scale shows the degree of risk

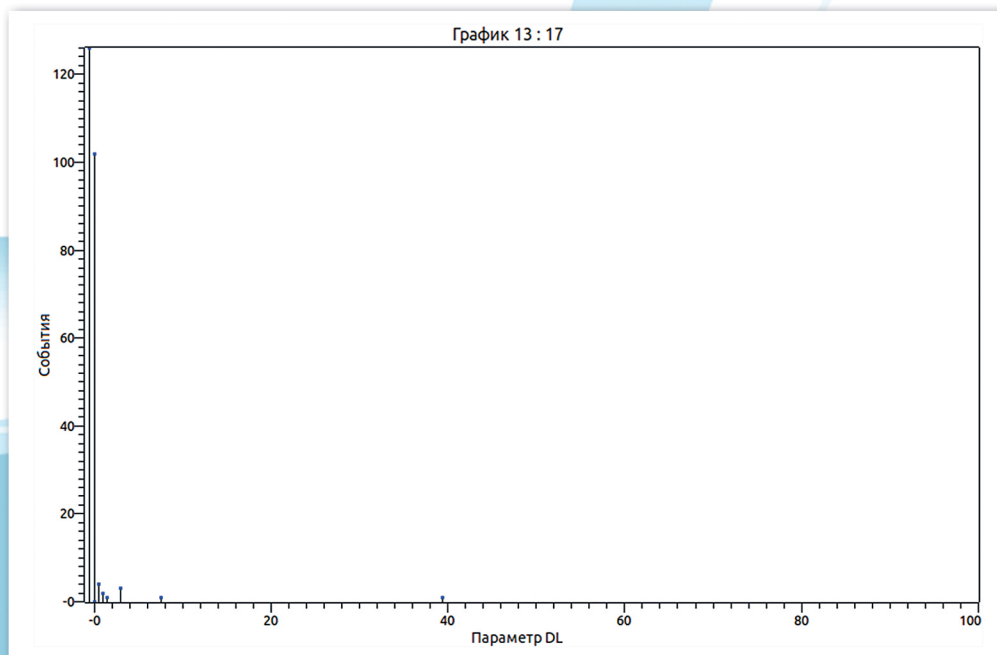


Рис. 5. Распределение сигналов электромагнитных помех по параметру DL

Fig. 5. Distribution of electromagnetic interference signals by DL parameter