

В. А. Крутова, Д. С. Фролова

ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ШУМА В СИСТЕМЕ ПОМЕЩЕНИЙ ВАГОНА-ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ПОЕЗДА

Аннотация. В ходе экспериментов, проведённых в замкнутых пространствах вагонов-электростанций, были выявлены неблагоприятные условия труда операторов [1-5]. Наиболее критическими оказались превышения виброакустических показателей. Верификация результатов, проведенная с применением инструментария теории неопределенностей, позволила разделить систематические и случайные погрешности, что крайне необходимо для оценки достоверности санитарно-гигиенического контроля [6-7]. Особую роль в данном процессе сыграла идентификация источников локальных акустических аномалий, что переводит задачу из чисто измерительной в инженерно-диагностическую плоскость. На основании полученных результатов измерений проведена обработка экспериментальных данных и выявлен доверительный интервал. В статье приведен пример расчета для одного помещения, так расчеты для остальных помещений выполнены таким же способом и в связи с громоздкостью не представлены. Представленная работа не только подтверждает корректность выполненных измерений, но и задает вектор для совершенствования методов обеспечения безопасности труда, объединяя метрологическую точность с прикладными инженерными решениями по защите персонала от вредных производственных факторов.

Ключевые слова: шумовые характеристики, вагоны-электростанции, восстановительные поезда, экспериментальные исследования, система помещений, шумомер, верификация, уровни звука.

Для цитирования: Крутова, В. А. Верификация результатов измерений шума в системе помещений вагона-электростанции восстановительного поезда / В. А. Крутова, Д. С. Фролова // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 53–59. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_53.

Экспериментальные исследования шумовых характеристик в помещениях вагона-электростанции восстановительного поезда проводились с целью оценки соответствия фактических уровней звукового давления установленным санитарно-гигиеническим нормативам и эксплуатационным требованиям. Исследования проводились согласно стандартной методики измерений, однако, любое измерение невозможно провести с абсолютным отсутствием погрешности, поэтому полученные данные подлежат тщательной верификации, поскольку от их достоверности зависят как состояние здоровья персонала, так и исправность чувствительного оборудования.

Первым этапом верификации стала проверка метрологического обеспечения измерительного оборудования. Шумомер первого класса точности прошел поверку и калибровку, которая выполнялась до и после каждой серии замеров с использованием эталонного источника звука, а отклонения не превысили 0,3 дБ, что находится в пределах допустимой погрешности. Микрофон устанавливался на высоте 1,5 метра от пола — в зоне нахождения головы оператора, с ориентацией под углом 70 градусов к источнику шума, как предписывает методика измерений. Уровни звукового давления получены методом прямых

измерений. Поэтому одной из главных задач экспериментальных исследований является оценка точности и достоверности измерений.

При измерении шумовых характеристик в вагоне-электростанции было выбрано четыре контрольные точки измерений. Каждой точке соответствует свой ряд измерения (таблица 1) по расчетным точкам. Оценка показателя эквивалентного общего уровня шума производилась в дизельном отделении - точка 1, на рабочем месте машиниста вагона-электростанции – точка 2, купе кухня-салон – точка 3, купе для отдыха – точка 4. Помещения были выбраны не случайно: они отражают как зоны с максимальным уровнем шумового воздействия (дизельное отделение), так и пространства, где требования к акустическому комфорту наиболее высоки (зоны отдыха). Каждая из четырёх контрольных точек, закреплённых за конкретным помещением, обеспечивает сбор данных с учётом пространственной неравномерности звукового поля, неизбежной в условиях ограниченного объёма вагона. Многократные повторные замеры в каждой точке снижают влияние случайных факторов, а последующая статистическая обработка позволяет с высокой достоверностью определить эквивалентные уровни звукового давления как в октавных полосах частот, так и по линейной характеристике. В таблице 1 приведен перечень показателей, используемых в процессе верификации.

Таблица 1

Перечень показателей, используемых в процессе верификации

Показатели	Эквивалентный уровень звукового давления, дБ			
Диапазон измерения	80 ... 100 дБ			
Метод измерения	Метод прямых измерений с использованием СИ утвержденного типа.			
Условия окружающей среды при которых испытания признаются валидными	Температура от +5°C до +40°C и влажность не более 80%			
Номер точки измерений	1	2	3	4
Место измерения	Дизельное отделение	Рабочее место машиниста	Купе кухня-салон для отдыха	Купе для отдыха

Алгоритм верификации заключался в следующем. Для вычисления уровня звукового давления (далее – УЗД) $L_{p,eq,m}$ на m -м интервале применяем выражение:

$$L_{p,eq,m} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1 \cdot L_{p,eq,m,i}} \right) \quad (1)$$

где $L_{p,eq,m}$ – уровень звукового давления; $L_{p,eq,m,i}$ – результаты единичных измерений уровня звукового давления в данном временном отрезке; N – количество выполненных измерений; m – номер интервала; i – номер единичного измерения в данном интервале.

Уровень звукового давления за весь период оценки T_0 определяется по формуле (2) с учетом длительности каждого интервала T_m :

$$L_{p,eq,T_0} = 10 \cdot \lg \left(\sum_{m=1}^m \frac{T_m}{T_0} 10^{0,1 \cdot L_{p,eq,m}} \right) \quad (2)$$

Полученные в ходе измерений данные систематизированы по временным отрезкам и сведены в таблицы, где для каждого интервала указаны значения единичных замеров, их количество, а также рассчитанный по формуле (1) эквивалентный уровень звукового давления. Результаты прямых единичных измерений УЗД для каждого интервала в каждой расчетной точке приведены в таблице 2. В качестве иллюстрации приводим данные измерений, полученные в первых двух помещениях в течении 8 временных отрезков.

Таблица 2

Результаты прямых единичных измерений УЗД на данном временном отрезке

Номер интервала	Уровень звукового давления, дБ					
	дизельное отделение (точка 1)			Рабочее место машиниста (точка 2)		
1	100,2	101,5	100,7	94,4	94,8	95,6
2	101,1	100,6	100,9	95,1	94,7	95,1
3	100,7	100,0	101,3	94,8	95,3	95,3
4	99,8	99,5	100,0	96,2	96,4	95,7
5	99,3	99,8	99,0	96,3	96,0	95,1
6	98,8	99,2	98,6	95,4	95,7	94,9
7	99,5	99,1	98,9	95,6	96,8	96,2
8	98,3	98,6	99,2	95,5	96,1	94,9

Полученные значения уровня звукового давления демонстрируют, что в течение всего периода оценки, равного 480 минутам, средний эквивалентный уровень шума в дизельном помещении (точка 1) оставался крайне высоким. Данный показатель практически не отклоняется от значений отдельных восьми временных отрезков, которые колебались в диапазоне от 98,2 до 100,7 дБА, что говорит о стабильности работы дизельных установок в течение смены, что характерно для штатного режима эксплуатации. Разница между крайними точками составляет всего 2,5 дБА, что подтверждает гомогенность акустической обстановки.

На следующем этапе для каждого временного промежутка и каждой точки проводился расчет итогового уровня звукового давления, в которой использовалось временное взвешивание T_0 с коэффициентом 60/480 для каждой точки измерения (таблица 3).

Таблица 3

Результаты расчетов средней величины в определенном временном отрезке на примере дизельного отделения (точка 1)

Номер интервала	$10 \cdot \lg \left(\sum_{m=1}^m \frac{T_m}{T_0} 10^{0,1 \cdot L_{p,eq,m}} \right)$	Итоговое значение, дБА
$L_{p,eq,1}$	$10 \cdot \lg \left(\frac{10^{0,1 \cdot 100,2} + 10^{0,1 \cdot 101,5} + 10^{0,1 \cdot 100,7}}{3} \right)$	100,83
$L_{p,eq,2}$	$10 \cdot \lg \left(\frac{10^{0,1 \cdot 101,1} + 10^{0,1 \cdot 100,6} + 10^{0,1 \cdot 100,9}}{3} \right)$	100,87
$L_{p,eq,3}$	$10 \cdot \lg \left(\frac{10^{0,1 \cdot 100,7} + 10^{0,1 \cdot 100,0} + 10^{0,1 \cdot 101,3}}{3} \right)$	100,70
$L_{p,eq,4}$	$10 \cdot \lg \left(\frac{10^{0,1 \cdot 99,8} + 10^{0,1 \cdot 99,5} + 10^{0,1 \cdot 100,0}}{3} \right)$	99,77
$L_{p,eq,5}$	$10 \cdot \lg \left(\frac{10^{0,1 \cdot 99,3} + 10^{0,1 \cdot 99,8} + 10^{0,1 \cdot 99,0}}{3} \right)$	99,38
$L_{p,eq,6}$	$10 \cdot \lg \left(\frac{10^{0,1 \cdot 98,8} + 10^{0,1 \cdot 99,2} + 10^{0,1 \cdot 98,6}}{3} \right)$	98,87
$L_{p,eq,7}$	$10 \cdot \lg \left(\frac{10^{0,1 \cdot 99,5} + 10^{0,1 \cdot 99,1} + 10^{0,1 \cdot 98,9}}{3} \right)$	99,17
$L_{p,eq,8}$	$10 \cdot \lg \left(\frac{10^{0,1 \cdot 98,3} + 10^{0,1 \cdot 98,6} + 10^{0,1 \cdot 99,2}}{3} \right)$	98,72

Особого внимания заслуживает методика расчета итогового уровня, что позволяет корректно учитывать вклад каждого 60-минутного интервала в общую 480-минутную

экспозицию. В данном случае все отрезки имеют одинаковую длительность, поэтому их вклад равнозначен, однако итоговая формула показывает, что эквивалентный уровень практически совпадает со средним арифметическим по всем отрезкам.

$$L_{p,eq,T_0} = 10 \lg(0,125 \cdot 10^{0,1 \cdot 100,83} + 0,125 \cdot 10^{0,1 \cdot 100,87} + 0,125 \cdot 10^{0,1 \cdot 100,70} + 0,125 \cdot 10^{0,1 \cdot 99,77} + 0,125 \cdot 10^{0,1 \cdot 99,38} + 0,125 \cdot 10^{0,1 \cdot 98,87} + 0,125 \cdot 10^{0,1 \cdot 99,17} + 0,125 \cdot 10^{0,1 \cdot 98,72}) = 99,87 \approx 100 \text{ дБА.}$$

При условии, что исходные параметры, от которых зависит эквивалентный уровень, не связаны между собой корреляцией, суммарная стандартная неопределённость u_c вычисляется по формуле (3) с использованием коэффициентов чувствительности и стандартных неопределённостей входных величин по формуле [9] Формула представляет собой классическое представление закона распространения неопределённостей:

$$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_b^2}, \quad (3)$$

где $u_b = 0,40$ дБ – стандартная неопределённость инструментальной составляющей, принятая как $\frac{0,7}{\sqrt{3}}$; u_a – стандартная неопределённость типа А, рассчитывается по формуле [10]:

$$u_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_{p,eq,n} - \bar{L}_{p,eq})^2}{n \cdot (n - 1)}}, \quad (4)$$

где $\bar{L}_{p,eq,n}$ – УЗД для n -го выборочного измерения при выполнении заданной трудовой функции; выборочных измерений [7], т. е. $\bar{L}_{p,eq} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N L_{p,eq,n}$.

Расширенная неопределённость U находится как:

$$U = k \cdot u_c. \quad (5)$$

где k – коэффициент охвата, который выбирается согласно ГОСТ 34100.3-2017 [8] для уровня доверия 95 %.

Результаты расчетов для дизельного отделения (точка 1):

1. Стандартная неопределённость типа А, рассчитанная по стандартной методике, составляет:

$$u_a = \sqrt{\frac{(100,83-99,87)^2 + (100,87-99,87)^2 + (100,70-99,87)^2 + (99,77-99,87)^2 + (99,38-99,87)^2 + (98,87-99,87)^2 + (99,17-99,87)^2 + (98,72-99,87)^2}{24 \cdot (24-1)}} = 0,036.$$

2. Суммарная стандартная неопределённость (вклад систематического лабораторного смещения признается незначительным):

$$u_c = \sqrt{0,036^2 + 0,40^2} = 0,40.$$

3. В соответствии с ГОСТ 34100.3 [8] число степеней свободы принимается равным бесконечности, а коэффициент охвата $k = 1,96$ при доверительной вероятности $P = 95 \%$.

Расширенная неопределённость, после округления до разряда допустимой погрешности:

$$U = 1,96 \cdot 0,40 = 0,78 \approx 0,8 \text{ дБ.}$$

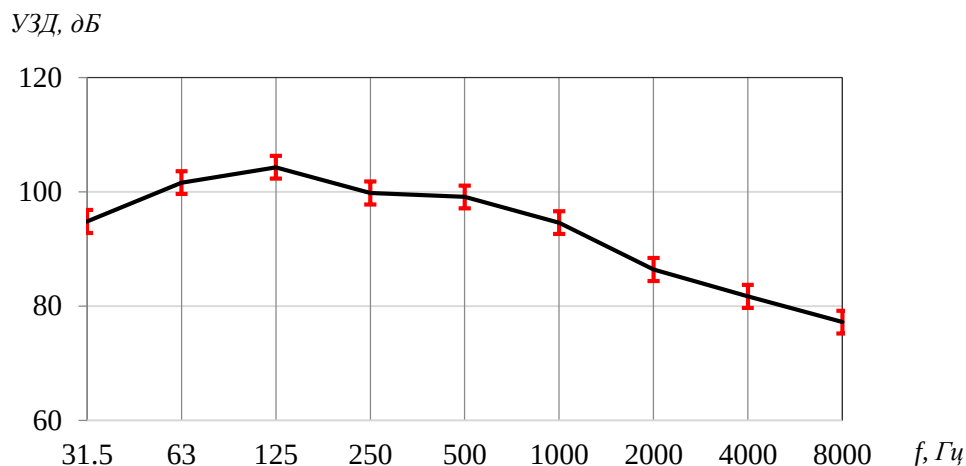


Рис. 1 Диапазон изменения уровней звукового давления с отображением расширенной погрешности в дизельном отделении

Заключение.

Измерения эквивалентного суммарного уровня звукового давления в диапазоне 80–100 дБ (по линейной характеристике шумомера) были успешно верифицированы на точность. Последующий анализ не выявил необходимости в корректирующих действиях. Предложенная методика статистической обработки экспериментальных данных позволяет объективно оценивать отклонения как реально зафиксированных значений, так и результатов математического моделирования. Полученные результаты могут быть распространены на другие типы подвижного состава со схожими условиями генерации шума.

Список литературы

1. **Фролова, Д. С.** Теоретическая оценка акустических характеристик в вагоне-электростанции восстановительного поезда / Д. С. Фролова, В. А. Крутова // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4. – С. 111–115. – ISSN 1818-5509.
2. Способы снижения шума и вибраций при проектировании, производстве и эксплуатации железнодорожного подвижного состава / И. В. Колесников, С. Ф. Подуст, С. С. Подуст, А. Н. Чукарин. – Москва : Всероссийский институт научной и технической информации Российской академии наук (ВИНИТИ РАН), 2015. – 216 с. – EDN WOBVJH.
3. **Подуст, С. Ф.** Закономерности формирования спектров шума, создаваемых воздушной составляющей, на рабочих местах локомотивных бригад электропоездов / С. Ф. Подуст // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2015. – № 1 (57). – С. 40–46. – ISSN 0201-727X.
4. **Яицков, И. А.** Проблемы негативного воздействия производственного шума на

References

1. **Frolova, D. S.** Theoretical assessment of acoustic characteristics in the power station car of the recovery train / D. S. Frolova, V. A. Krutova // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2022. - No. 4. - P. 111-115. - ISSN 1818-5509.
2. Methods for reducing noise and vibration during the design, production and operation of railway rolling stock / I. V. Kolesnikov, S. F. Podust, S. S. Podust, A. N. Chukarin. - Moscow: All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences (VINITI RAS), 2015. - 216 p. - EDN WOBVJH.
3. **Podust, S. F.** Regularities of formation of noise spectra created by the air component at the workplaces of locomotive crews of electric locomotives / S. F. Podust // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. - 2015. - No. 1 (57). - P. 40-46. - ISSN 0201-727X.
4. **Yaitskov, I. A.** Problems of the negative impact of industrial noise on railway workers /

работников железнодорожного транспорта / И. А. Яицков, И. Г. Переверзев, Т. А. Финоченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 4. – С. 112-114. – EDN YURPTF.

5. **Яицков, И. А.** Теоретическое исследование воздушной составляющей шума силовых установок транспортных машин / И. А. Яицков // Интернет-журнал Науковедение. – 2017. – Т. 9, № 6. – С. 31. – EDN YSAHJH.

6. **Фролова, Д. С.** Анализ результатов экспериментальных измерений вибрации и внутреннего шума вагона-электростанции восстановительного поезда, возникающих при работе дизель-генераторных установок / Д. С. Фролова // Безопасность труда в промышленности. – 2024. – № 2. – С. 34–41. – DOI 10.24000/0409-2961-2024-2-34-41.

7. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: утверждены постановлением главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 г. № 2. – Текст: электронный. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115?ysclid=lu9qp1pvc2927493028>.

8. **Иванов, Н. И.** Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом : учебник / Н. И. Иванов. – Москва : Логос, 2013. – 432 с. – ISBN 978-5-98704-659-3.

9. ГОСТ Р ИСО 9612-2013. Акустика. Измерения шума для оценки его воздействия на человека. Метод измерений на рабочих местах: введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 05 декабря 2013 г. № 2180-ст. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 67 с.

10. ГОСТ 34100.3-2017. Неопределенность измерения. Часть 3: Руководство по выражению неопределенности измерения: межгосударственный стандарт: издание официальное: введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 сентября 2018 г. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12

I. A. Yaitskov, I. G. Pereverzev, T. A. Finochenko // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. – 2018. – No. 4. – P. 112-114. – EDN YURPTF.

5. **Yaitskov, I. A.** Theoretical study of the air component of noise of power plants of transport vehicles / I. A. Yaitskov // Internet journal Naukovedenie. – 2017. – Vol. 9, No. 6. – P. 31. – EDN YSAHJH.

6. **Frolova, D. S.** Analysis of the results of experimental measurements of vibration and internal noise of the power station car of the recovery train arising during the operation of diesel generator sets / D. S. Frolova // Bezopasnost' truda v promyshlennosti. – 2024. – No. 2. – P. 34-41. – DOI 10.24000/0409-2961-2024-2-34-41.

7. SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans: approved by the Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated January 28, 2021, No. 2. – Text: electronic. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115?ysclid=lu9qp1pvc2927493028>.

8. **Ivanov, N. I.** Engineering acoustics. Theory and practice of noise control: textbook / N. I. Ivanov. – Moscow: Logos, 2013. – 432 p. – ISBN 978-5-98704-659-3.

9. GOST R ISO 9612-2013. Acoustics. Noise measurements for assessing its impact on humans. Method of measurements at workplaces: put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 5, 2013, No. 2180-st. – Moscow: Standartinform, 2014. – 67 p.

10. GOST 34100.3-2017. Measurement uncertainty. Part 3: Guidelines for the Expression of Measurement Uncertainty: Interstate standard: official publication: introduced as the national standard of the Russian Federation on September 1, 2018 by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated September 12, 2017 No. 1065-art. Moscow:

сентября 2017 г. № 1065-ст. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 104 с. – Текст: электронный. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293743/4293743700.pdf> (дата обращения: 16.11.2024).

Standartinform, 2018. 104 p. – Text: electronic. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293743/4293743700.pdf> (date of access: 11/16/2024).

V. A. Krutova, D. S. Frolova

VERIFICATION OF NOISE MEASUREMENT RESULTS IN THE SYSTEM OF THE RECOVERY TRAIN'S CAR-ELECTRIC STATION

Abstract. In the course of experiments conducted in confined spaces of power plant wagons, unfavorable working conditions of operators were revealed [1-5]. The most critical were the exceedances of vibroacoustic parameters. Verification of the results, carried out using the tools of uncertainty theory, made it possible to separate systematic and random errors, which is extremely necessary to assess the reliability of sanitary and hygienic control [6-7]. A special role in this process was played by the identification of sources of local acoustic anomalies, which translates the task from a purely measuring to an engineering diagnostic plane. Based on the obtained measurement results, experimental data were processed and a confidence interval was determined. The article provides an example of a calculation for one room, as calculations for other rooms are performed in the same way and are not presented due to the bulkiness. The presented work not only confirms the correctness of the measurements performed, but also sets a vector for improving occupational safety methods, combining metrological accuracy with applied engineering solutions to protect personnel from harmful industrial factors.

Keywords: noise characteristics, power plant cars, recovery trains, experimental studies, room system, sound level meter, verification, sound levels.

For citation: Krutova, V. A. Verification of Noise Measurement Results in the System of the Recovery Train's Car-Electric Station / V. A. Krutova, D. S. Frolova // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobseniya. – 2025. – № 4. – P. 53–59. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_53.

Сведения об авторах

Крутова Вероника Александровна

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, кафедра «Механика деформируемого твердого тела», доктор технических наук, профессор, e-mail: krutova_va@voenmeh.ru

Фролова Дарья Сергеевна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Проектирование и технология производства машин», кандидат технических наук, доцент, e-mail: frolovads@rgups.ru

Information about the authors

Krutova Veronika Aleksandrovna

Baltic State Technical University VOENMEH named after D.F. Ustinov, Chair «Mechanics of a Deformable Solid», Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: krutova_va@voenmeh.ru

Frolova Darya Sergeevna

Rostov State Transport University (RSTU), Chair «Machine Design and Production Technology», Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: frolovads@rgups.ru