

С. П. Рыжов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ШУМА ЗУБОДОЛБЕЖНЫХ СТАНКОВ

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований спектров шума и вибраций, проявляющихся в зубодолбежных станках при их промышленной эксплуатации под различными технологическими нагрузками. В зависимости от технических параметров этих станков в процессе выполнения работ согласно технологическому регламенту идентифицируются источники, создающие повышенные уровни шума, а именно резец и заготовка, тогда как влияние станины можно проигнорировать. Это подтверждается теоретическими выводами о закономерностях формирования виброакустических характеристик зубодолбежных станков. На основании проведенных исследований удалось выделить ключевые факторы, влияющие на величину шумов и вибраций в зубодолбежных станках. В первую очередь это конструктивные особенности резца и материала заготовки. Различные геометрические параметры резца, такие как угол заострения, форма и степень заточки, существенно изменяют картину распределения вибраций в процессе резания. Более того, материалы с более высоким модулем упругости и плотностью способствуют повышению общей амплитуды вибраций, что отражается на спектре шума.

Ключевые слова: экспериментальные исследования, уровни звука, октавные уровни звукового давления и вибраций, зубодолбежные станки.

Для цитирования: Рыжов, С. П. Экспериментальные исследования спектрального состава шума зубодолбежных станков / С. П. Рыжов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 41–48. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_41.

Введение

Зубчатое колесо стало неотъемлемым атрибутом, так как практически все машины содержат в себе зубчатые передачи, которые отличаются универсальностью и способностью выдерживать большие нагрузки, а также удобны в сборке и обслуживании. Зубодолбежные станки предназначены для формирования прямых и косых зубьев на колесах цилиндрической формы, имеющих наружное и внутреннее расположение зубьев. С помощью станков данной группы обрабатываются цилиндрические колеса с зубьями различных типов зацеплений, их блоки, зубчатые муфты, рейки, зубчатые секторы, шлицевые валики, храповики и т.д. Обработка производится методом обкатки (рис. 1). При нарезании косозубых колес долбяку сообщается дополнительное вращательное движение от соответствующих направляющих.



Рис. 1. Особенности обработки на зубодолбежном станке обкатного типа

Зубодолбежные станки осуществляют процесс резания возвратно-поступательным движением инструмента, а при наличии специальных долбяков можно обрабатывать плоские фасонные детали.

Экспериментальные исследования спектров шума зубодолбежных станков

Экспериментальные исследования спектров шума и вибраций проводились для станков с кривошипным и гидравлическим приводом главного двигателя как на холостом ходу, так и при реализации технологического процесса, как указывалось выше, для ситуаций с максимальным значением превышения уровня звука над нормативной величиной [1–5]. Спектры шума вертикального зубодолбежного станка модели 5111 представлены на рис. 2 и 3.

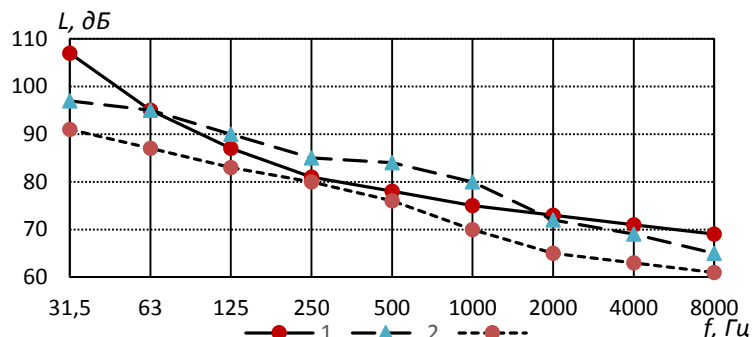


Рис. 2. Спектры шума для станка модели 5111 с кривошипным приводом при работе на холостом ходу:

1 – предельно допустимый спектр; 2 – при частоте 1600 двойных ходов в минуту;
3 – при частоте 250 двойных ходов в минуту

При анализе характерных особенностей шума станка на холостом ходу при различных режимах работы важно учитывать изменение звукового давления в зависимости от частоты. Измерения шума станка на холостом ходу показали, что при 1600 двойных ходах в минуту возникает значительное акустическое воздействие, превышающее допустимые нормы на 3–6 дБ в частотном диапазоне 250–1000 Гц и особенно в пятой октаве. Спектр, образующийся при таком режиме, характеризуется относительно равномерным спадом звуковой интенсивности с увеличением частоты. В диапазоне частот от 31,5 до 1000 Гц интенсивность звуковой энергии падает на 2–3 дБ на октаву, и только при переходе от шестой к седьмой октаве уровень звукового давления снижается на 10 дБ. В восьмой и девятой октавах уменьшение уровней звукового давления достигает 2–3 дБ. При 250 двойных ходах в минуту уровни звукового давления остаются в пределах допустимых значений по всему регулируемому частотному диапазону.

Разница в уровнях звукового давления, в зависимости от числа двойных ходов в минуту, колеблется в пределах 6–10 дБ. Теоретически рассчитанное значение составляет:

$$\Delta L = 10 \lg \frac{n_1}{n_2} = 10 \lg \frac{1600}{250} = 8 \text{ дБ.}$$

Процесс обработки зубчатого колеса изменяет интенсивность спектральных составляющих шума (рис. 3), однако его характер при этом соответствует спектру шума холостого хода.

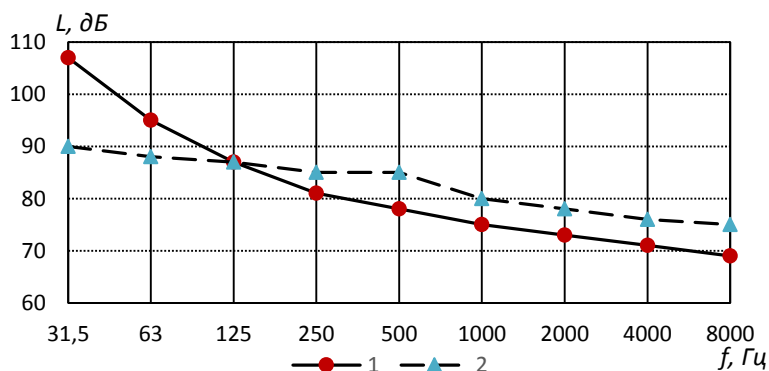


Рис. 3. Спектр шума станка модели 5111:

1 – предельно допустимый спектр; 2 – шум при обработке зубчатых колёс

При обработке зубчатого колеса диаметром 80 мм, модулем 1 мм, при $n = 1600$ дв. ход/мин, уровни звукового давления составляют от 5 до 10 дБ. Максимальное значение превышения зафиксировано в пятой октаве. В шестой – девятой октавах уровни звукового давления превышают норматив на 6 дБ. Анализируя спектры звукового давления, следует обратить внимание на характерные особенности изменений в отдельных октавных полосах. Повышенный уровень шума в пятой октаве может быть связан с резонансными явлениями в системе «станок – заготовка», что, в свою очередь, может повлиять на точность и качество обработки. Учитывая, что модуль зубчатого колеса составляет 1 мм, важно рассмотреть динамические характеристики станка и возможность их оптимизации для снижения шума.

Исследование и анализ шумовых спектров холостого хода зубодолбежных станков моделей 5122 и 5122В, представленных на рис. 4, выявляет значимые отклонения в уровне звукового давления. Превышение нормативных значений уровней звукового давления на 2–3 дБ зафиксировано в полосах пятой и шестой октавах.

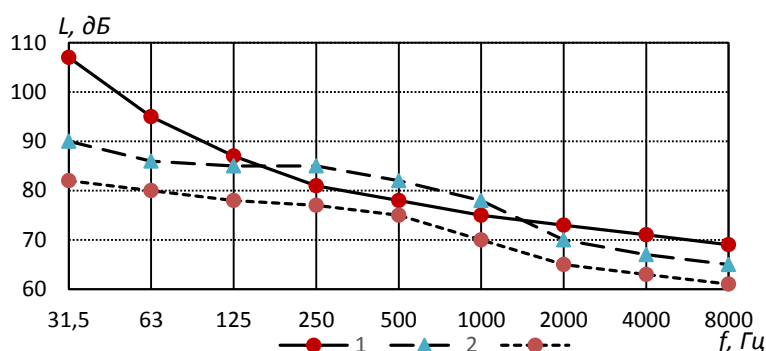


Рис. 4. Спектры шума при холостом ходе зубодолбежных станков моделей 5122 и 5122В:
1 – предельно допустимый спектр; 2 – при числе 850 двойных ходов в минуту;
3 – при числе 200 двойных ходов в минуту

При сопоставлении уровней шума при наибольшем и наименьшем количестве двойных ходов, можно сказать, что разница в уровнях звукового давления согласно экспериментальным данным составляет 5–8 дБ, это подтверждается и теоретическими расчетами:

$$\Delta L = 10 \lg \frac{850}{250} = 6 \text{ дБ.}$$

Уровни шума, генерируемые на холостом ходу зубодолбежного вертикального станка модели 5122В, приведены на рис. 5.

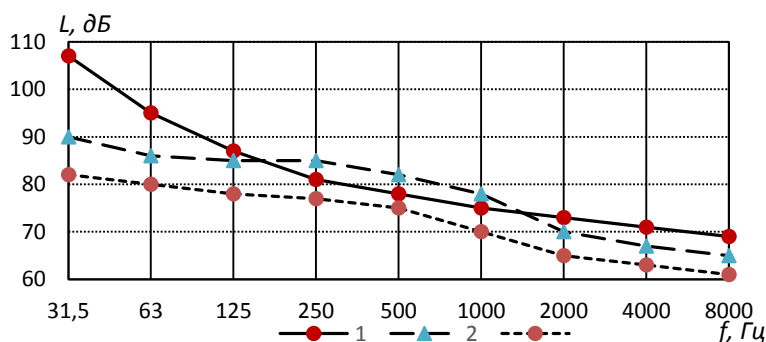


Рис. 5. Спектры шума холостого хода станка модели 5122В:
1 – предельно допустимый спектр; 2 – при числе 1200 двойных ходов в минуту;
3 – при числе 280 двойных ходов в минуту

Уровни звукового давления холостого хода зубодолбежного станка модели 5122В выше, чем у станков 5122 и 5122В, и ниже, чем у станка 5111. Эта закономерность подтверждается соотношением числа двойных ходов в минуту $\Delta L = 10 \lg \Delta n$, где Δn – отношение числа двойных ходов в минуту. Уровни

звукового давления превышают нормативные значения в четвертой – шестой октавах, а величины превышения составляют 3–4 дБ.

Спектральные характеристики шума, полученные при обработке зубчатых колес диаметром 200 мм, с модулем 4,5 мм на зубодолбежных станках моделей 5122, 5122В и 5122Б, при максимальных показателях числа двойных ходов, представлены на рис. 6.

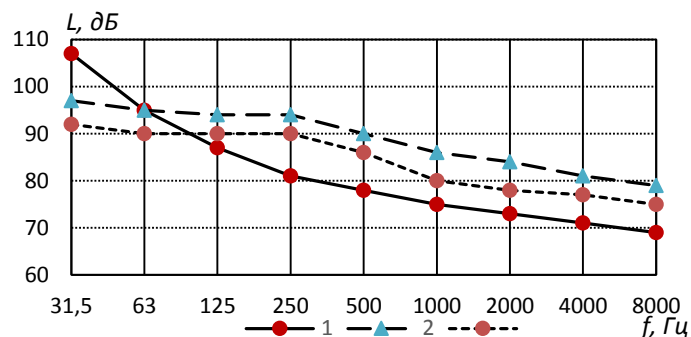


Рис. 6. Спектры шума станков в рабочем режиме:

1 – предельно допустимый спектр; 2 – модели 5122Б; 3 – модели 5122 и 5122В

Как видно из полученных результатов измерений при обработке зубчатых колес у станков 5122Б, 5122 и 5122В превышения уровней звукового давления составляют 4–5 дБ. Эти данные с достаточно высокой точностью подтверждаются теоретическими расчётами $\Delta L = 10 \lg \Delta N n$ (где N – мощностью резания, кВт; n – число двойных ходов в минуту).

$$\Delta L = 10 \lg \Delta \frac{3,7 \cdot 1200}{3,1 \cdot 850} = 2,4 \text{ дБ};$$

$$\Delta L = 10 \lg \Delta \frac{3,7 \cdot 1200}{2,1 \cdot 850} = 4 \text{ дБ}.$$

В результате уровень звукового давления для станков указанных моделей превышает норму в диапазоне третьей – девятой октав. Для станка модели 5122Б величина превышения уровней звукового давления составляет 8–15 дБ, а для станков моделей 5122 и 5122В – 4–10 дБ.

При замерах звукового давления на зубодолбежных станках моделей 5140 и 5М150 в режиме холостого хода обнаружилось, что разница составляет 2 дБ, что практически соответствует погрешностям проведения эксперимента. Измеренные уровни звукового давления станка модели 5140 выше, чем у станка 5М150, что подтверждается теоретическими расчетами:

$$\Delta L = 10 \lg \Delta \frac{450}{212} = 3 \text{ дБ}.$$

Вследствие снижения количества числа двойных ходов в минуту (в сравнении со станками модельного ряда 5111 и гаммы станков 5122) уровни звукового давления находятся в пределах санитарных норм (рис. 7).

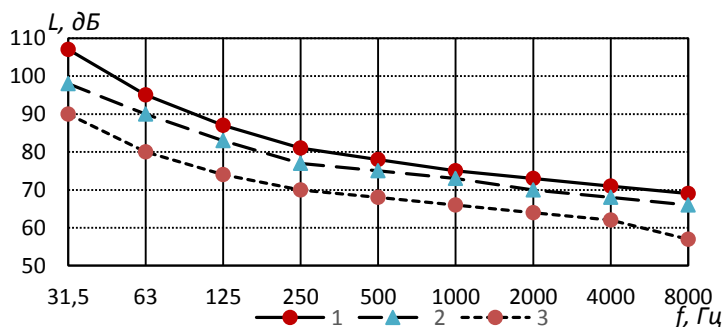


Рис. 7. Спектры шума холостого хода зубодолбежных станков моделей 5140 и 5М150:

1 – предельно допустимый спектр; 2 – при числе 450 двойных ходов в минуту;
3 – при числе 65 двойных ходов в минуту

Разница в уровнях звукового давления на зубодолбежном станке модели 5140, при обработке зубчатых колес диаметром 500 мм при модуле 3 мм и диаметром 800 мм при модуле 12 мм, составляет 3–5 дБ (рис. 8).

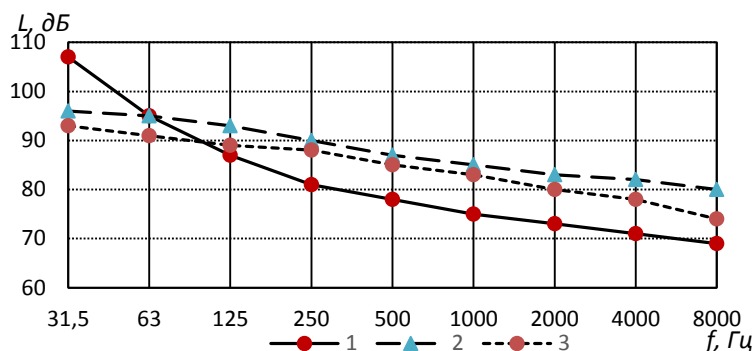


Рис. 8. Спектры шума станков в рабочем режиме:

1 – предельно допустимый спектр; 2 – модели 5M150; 3 – модели 5140

Важно подчеркнуть, что уровни звукового давления станка модели 5M150 выше, чем у станка 5140. Объясняется это соотношением мощностей приводов главного движения и диаметром зубчатых колес, подвергающихся обработке. В результате уровни звукового давления в интервале 125–8000 Гц превышают нормативные значения на 8–13 дБ для станка модели 5M150 и на 3–10 дБ для станка модели 5140.

У станка модели 5M150, который является наиболее «шумным» из всей гаммы рассматриваемых станков, звуковое давление в точках по обе стороны от рабочего места практически идентично и не превышает 84 дБ на частотах от 500 до 8000 Гц (рис. 9).

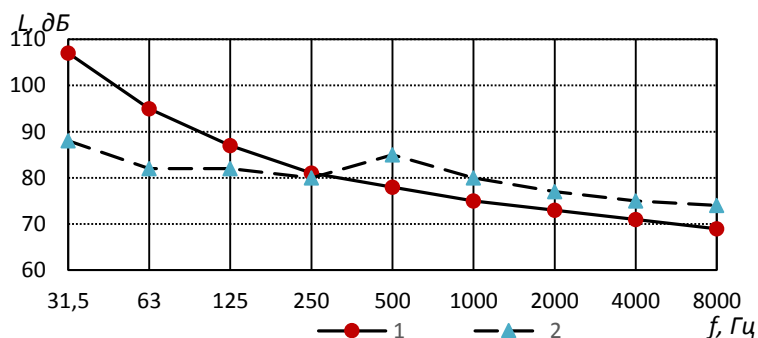


Рис. 9. Спектры шума в рабочем режиме станка модели 5M150:

1 – предельно допустимый спектр; 2 – в точках справа и слева от рабочего места

Измерение уровней шума гаммы зубодолбежных станков с гидрофицированным приводом главного движения показало, что на холостом ходу уровни звукового давления не превышают санитарных норм. На рис. 10 представлены результаты измерений на примере наиболее «шумного» на холостом ходу станка модели 5111.

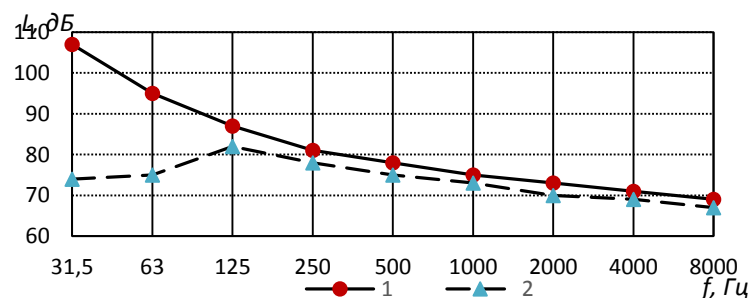


Рис. 10. Спектры шума холостого хода станка модели 5111:

1 – предельно допустимый спектр; 2 – с гидрофицированным приводом долбяка

Спектры шума при реализации аналогичных технологических процессов обработки колес гидрофицированных зубодолбежных станков приведены на рис. 11

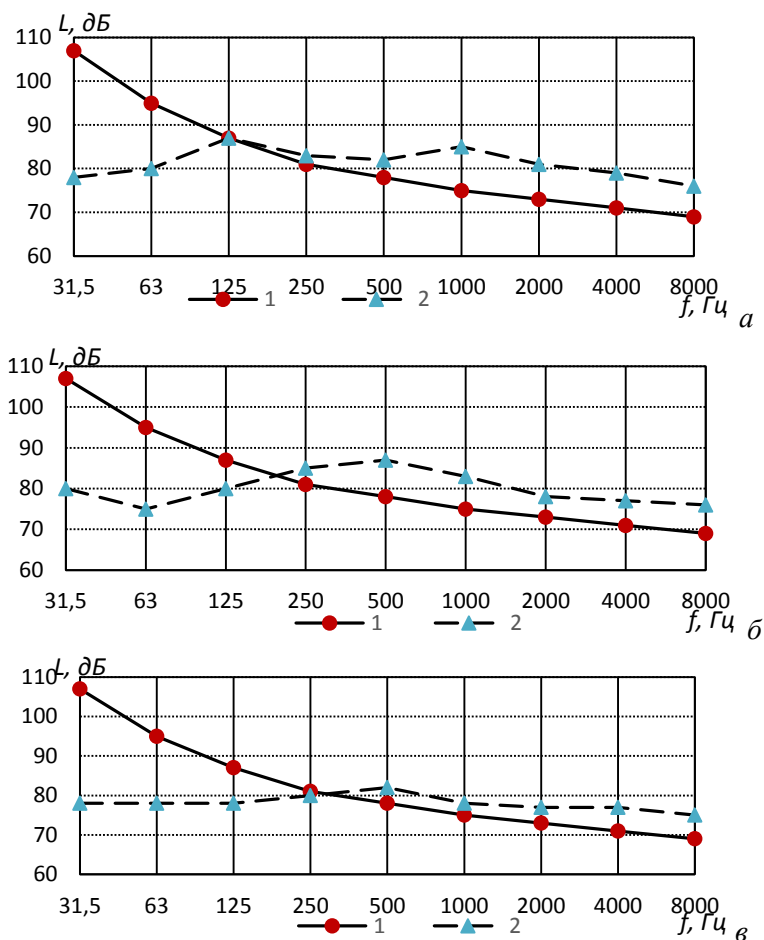


Рис. 11. Спектры шума гидрофицированных станков в рабочем режиме:

1 – предельно допустимый спектр; 2 – экспериментальные значения спектров шума на станках:
а – модели 5111; б – модели 5122Б; в – модели 5М150

Проведенные исследования показали, что при частотах до 500 Гц наблюдается снижение уровней звукового давления на 8–10 дБ. Это связано с уменьшением влияния динамических свойств кривошипного механизма долбяка. На средних частотах 500 и 1000 Гц спектр шума остается практически неизменным. Однако по мере увеличения частоты 2000 Гц и выше наблюдается заметное снижение звукового давления. Это связано с резонансными явлениями в конструкции долбяка, а также с уменьшением амплитуды колебаний отдельных элементов механизма. При частотах свыше 2000 Гц уровни звукового давления могут уменьшаться на 10–15 дБ, что делает возможным применение дополнительных методов шумоизоляции и демпфирования.

Заключение

Исследования, выполненные экспериментальным путем, наглядно показали, что основными источниками шумового дискомфорта, существенно влияющими на звуковое поле, формирующееся на рабочем месте операторов зубодолбежных станков, являются узлы резания и обрабатываемые зубчатые колеса. Кроме того, выявлено, что уровень шума может значительно варьироваться в зависимости от типа обработки и характеристик используемых режущих инструментов [6–10], так как более острый инструмент создает меньшую вибрацию, а значит, и меньший звуковой фон по сравнению с тупыми или поврежденными режущими краями. Специфика материала обрабатываемой заготовки также играет важную роль: твердые металлические материалы часто генерируют более интенсивный шум, нежели мягкие, такие как алюминий или пластик.

В первую очередь это относится к узлу резания, который является главным источником акустических волн в процессе обработки. Вибрации, возникающие в процессе резания металла, передаются

через конструкцию станка и распространяются в окружающее пространство, создавая звуковое поле, которое может достигать критических уровней на рабочем месте.

Другим важным источником шума являются приводы и трансмиссионные механизмы станков. Трение в подшипниках, динамические нагрузки на валы и передачи, а также резонансные явления в элементах конструкции способствуют увеличению общего уровня акустического дискомфорта. Неточные настройки или износ отдельных компонентов могут усугубить ситуацию, вызывая дополнительные вибрации и, соответственно, повышая уровень шума.

Список литературы

1 **Баланова, М. В.** Методика и техническое обеспечение проведения экспериментальных исследований по определению шума на рабочих местах / М. В. Баланова, Т. А. Финоченко, И. А. Яицков // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 1 (46). – С. 5–7. – ISSN 1818-5509.

2 **Финоченко, Т. А.** Методика проведения экспериментальных исследований шума прутковых токарных автоматов / Т. А. Финоченко // Инновационные технологии в машиностроении и металлургии : материалы IV Международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону : Донской государственный технический университет, 2012. – С. 263–268. – EDN JDVMJB.

3 Безопасность жизнедеятельности : учебное пособие / И. Г. Переверзев, Т. А. Финоченко, И. А. Яицков [и др.] ; ФГБОУ ВО РГУПС. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ростов-на-Дону, 2019. – 308 с. – ISSN 978-5-88814-843-3.

4 **Финоченко, Т. А.** Методика проведения экспериментальных исследований шума прутковых токарных автоматов / Т. А. Финоченко // Инновационные технологии в машиностроении и металлургии : Министерство промышленности и энергетики. – Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2012. – С. 263–268. – EDN JDVMJB.

5 **Набоков, А. Е.** Экспериментальные исследования шума на рабочих местах станочников резьбообрабатывающих и шлицефрезерных станков / А. Е. Набоков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 5. – С. 77–84. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-5-77-78.

6 Model validation of the acoustic systems "tooth wheels – mandrels" of the vertical gear generator and gear shaping machines / S. Ryzhov, T. Finochenko, A. Chukarin, I. Yaitskov // Akustika. – 2021. – Vol. 41. – P. 90–93. – DOI 10.36336/akustika20214190.

7 **Месхи, Б. Ч.** Математическое моделирование шумообразования системы инструмент–заготовка при фрезеровании и шлифовании / Б. Ч. Месхи, В. А. Гергерт // Строительство-2003 : материалы Международной научно-

References

1 **Balanova, M. V.** Methodology and technical support for conducting experimental studies to determine noise in the workplace / M. V. Balanova, T. A. Finochenko, I. A. Yaitskov // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2019. – No. 1 (46). – P. 5–7. – ISSN 1818-5509.

2 **Finochenko, T. A.** Methodology for conducting experimental studies of the noise of bar turning machines / T. A. Finochenko // Innovative technologies in mechanical engineering and metallurgy : Proceedings of the IV International scientific and practical conference. – Rostov-on-Don : Don State Technical University, 2012. – P. 263–268. – EDN JDVMJB.

3 Life safety : textbook / I. G. Pereverzev, T. A. Finochenko, I. A. Yaitskov [et al.] ; FSBEI VO RSTU – 2nd ed., rev. and add. – Rostov-on-Don, 2019. – 308 p. – ISSN 978-5-88814-843-3.

4 **Finochenko, T. A.** Methodology for conducting experimental studies of the noise of bar turning machines / T. A. Finochenko // Innovative technologies in mechanical engineering and metallurgy : Ministry of Industry and Energy. – Rostov-on-Don : DSTU Publishing Center, 2012. – P. 263–268. – EDN JDVMJB.

5 **Nabokov, A. E.** Experimental studies of noise at the workplaces of machine operators of thread-processing and spline-milling machines / A. E. Nabokov // Bulletin of Tula State University. Technical Sciences. – 2023. – No. 5. – P. 77–84. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-5-77-78.

6 Model validation of the acoustic systems "tooth wheels – mandrels" of the vertical gear generator and gear shaping machines / S. Ryzhov, T. Finochenko, A. Chukarin, I. Yaitskov // Akustika. – 2021. – Vol. 41. – P. 90–93. – DOI 10.36336/akustika20214190.

7 **Meskhi, B. Ch.** Mathematical modeling of noise generation in the tool-workpiece system during milling and grinding / B. Ch. Meskhi, V. A. Gergert // Construction-2003 : materials of the International Scientific-Practical Conference

практической конференции / РГСУ. – Ростов на-Дону, 2003. – С. 50–57. – EDN VIHKAD.

8 **Рыжов, С. П.** Обоснование акустических моделей систем «зубчатые колеса-оправки» зубодолбежных и зубострогальных станков / С. П. Рыжов, А. Н. Чукарин, Т. А. Финоченко // Noise Theory and Practice. – 2022. – Т. 8, № 4 (31). – С. 77–85. – EDN HHARVQ.

9 **Месхи, Б. Ч.** Исследование виброакустических характеристик малошумного механизма поддержки прутка / Б. Ч. Месхи, Т. А. Финоченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2009. – № 4. – С. 27–30. – ISSN 0201-727X.

10 Характеристики шумового дискомфорта в рабочей зоне прутковых токарных станков / С. А. Раздорский, Т. А. Финоченко, А. Н. Чукарин, И. А. Яицков // Мониторинг. Наука и технологии. – 2018. – № 3(36). – С. 81–84. – EDN YCMIFF.

/ RSUCE. – Rostov-on-Don, 2003. – P. 50–57. – EDN VIHKAD.

8 **Ryzhov, S. P.** Justification of acoustic models of "gear – mandrels" systems of gear shaping and gear planing machines / S. P. Ryzhov, A. N. Chukarin, T. A. Finochenko // Noise Theory and Practice. – 2022. – Vol. 8, No. 4 (31). – P. 77–85. – EDN HHARVQ.

9 **Meskhi, B. Ch.** Study of vibroacoustic characteristics of low-noise rod support mechanism / B. Ch. Meskhi, T. A. Finochenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2009. – No. 4. – P. 27–30. – ISSN 0201-727X.

10 Characteristics of noise discomfort in the working area of bar turning machines / S. A. Razdorsky, T. A. Finochenko, A. N. Chukarin, I. A. Yaitsov // Monitoring. Science and Technology. – 2018. – No. 3 (36). – P. 81–84. – EDN YCMIFF.

S. P. Ryzhov

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE SPECTRAL COMPOSITION OF GEAR-SHAPING MACHINE NOISE

Abstract. The article presents the results of experimental studies of noise and vibration spectra that occur in gear-shaping machines during their industrial operation under various process loads. Depending on the technical parameters specifications of these machines, during the execution of work according to the process regulations, the sources that create increased noise levels are identified, namely the cutter and the workpiece, while the influence of the frame can be ignored. This is confirmed by theoretical conclusions about the patterns of formation of vibroacoustic characteristics of gear-shaping machines. Based on the conducted studies, it was possible to identify the key factors that affect the magnitude of noise and vibration in gear-shaping machines. First of all, these are the design features of the cutter and the workpiece material. Various geometric parameters of the cutter, such as sharpening angle, shape and degree of sharpening, significantly change the pattern of vibration distribution during the cutting process. Moreover, materials with a higher modulus of elasticity and density contribute to an increase in the overall vibration amplitude, which is reflected in the noise spectrum.

Keywords: experimental studies, sound levels, octave levels of sound pressure and vibrations, gear shaping machines.

For citation: Ryzhov, S. P. Experimental studies of the spectral composition of gear shaping machine noise / S. P. Ryzhov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No 4. – P. 41–48. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_41.

Сведения об авторах

Рыжов Сергей Петрович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), кафедра «Безопасность жизнедеятельности», соискатель, e-mail: ryzhov_2014@mail.ru

Information about the authors

Ryzhov Sergey Petrovich

Rostov State Transport University (RSTU), Chair «Life Safety», The Degree Applicant, e-mail: ryzhov_2014@mail.ru