

УДК: 534.21: 621.92 + 06  
OECD: 1.03 AA

## Обоснование акустических моделей систем «зубчатые колеса-оправки» зубодолбежных и зубострогальных станков

Рыжов С.П.<sup>1</sup>, Чукарин А.Н.<sup>2</sup>, Финоченко Т.А.<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> Аспирант

<sup>2</sup> Д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Основы проектирования машин»

<sup>3</sup> К.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности»

<sup>1,2,3</sup> Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, РФ

### Аннотация

Одной из технических характеристик станочного оборудования, в значительной степени, определяющей не только безопасные условия труда станочников, но и конкурентоспособность самого оборудования, являются уровни звукового давления, генерируемые на рабочих местах. Следует отметить, что в этом направлении выполнен ряд работ теоретической и практической направленности по снижению уровней шума группы универсальных токарных, фрезерных, шлифовальных станков. Однако, виброакустические характеристики зубодолбежных и зубострогальных станков практически не изучены. Станки данной группы предназначены для изготовления зубчатых колес и реализуют технологический процесс обработки лезвийным инструментом. Уровни шумового дискомфорта, возникающего на рабочих местах обслуживающего персонала, станков этой группы достигают значений 96 дБА. Акустические модели, рассмотренные в статье, позволяют теоретически рассчитывать спектральные уровни звукового давления вышеуказанных источников шумового дискомфорта на этапе проектирования и установки оборудования, а также выявлять частотные интервалы и величины превышений над санитарными нормами.

**Ключевые слова:** технологические характеристики, шум, вибрация, зубострогальный станок, зубодолбежный станок, собственные частоты колебаний зубчатых колес, акустические модели.

### *Substantiation of acoustic models of 'gear wheels-mandrels' systems of gear shaping and gear cutting machines*

Ryzhov S.P.<sup>1</sup>, Chukarin A.N.<sup>2</sup>, Finochenko T.A.<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> Postgraduate student

<sup>2</sup> DSc, full Professor, Head of the Department of 'Fundamentals of Machine Design'

<sup>3</sup> PhD, Associate Professor, Head of the Department of 'Life Safety'

<sup>1,2,3</sup> Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

### Abstract

One of the technical characteristics of machine tools, which largely determines not only the safe working conditions of machine operators, but also the competitiveness of the equipment itself, is the sound pressure levels generated at workplaces. It should be noted that in this direction, a number of theoretical and practical works have been carried out to reduce the noise levels of a group of universal turning, milling, and grinding machines. However, the vibroacoustic characteristics of gear shaping and gear cutting machines are practically not studied. The machines of this group are designed for the manufacture of gears and implement

*the technological process of processing with a blade tool. The levels of noise discomfort that occurs at the workplaces of service personnel, machines of this group reach values of 96 dBA. The acoustic models discussed in the article make it possible to theoretically calculate the spectral levels of sound pressure of the above sources of noise discomfort at the stage of designing and installing equipment, as well as to identify frequency intervals and values of excesses over sanitary standards.*

**Keywords:** *technological characteristics, noise, vibration, gear planing machine, gear shaping machine, natural vibration frequencies of gears, acoustic models.*

## **Введение**

На зубодолбежных и зубострогальных станках нарезаются зубчатые колеса, очень существенно отличающихся между собой диаметрами и длиной обрабатываемого зуба. Анализ компоновок станков позволяет предположить, что в общей колебательной системе наиболее интенсивное излучение звуковой энергии создается двумя подсистемами режущим инструментом и обрабатываемой заготовкой, как открытых источников шума и имеющих максимальные величины изгибной жесткости [1-3]. У зубодолбежных станков открытыми источниками звуковой энергии, находящимися в непосредственной близости от станочника, являются долбяк и заготовка, а у зубострогальных – люлька и обрабатываемое колесо. Идентичность компоновок вышеуказанных колебательных систем позволяет использовать единый подход к теоретическому моделированию процессов виброакустической динамики. Действительно, при геометрических параметрах планшайбы и долбяка обосновано использование модели круговой пластины (аналогично обрабатываемым зубчатым колесам). Следует отметить, что ввиду особенности процесса обработки деталей на таком оборудовании не позволяет использовать разработанные для универсальных фрезерных станков теоретические модели шумообразования и методы расчета спектров шума.

## **1. Технологические характеристики станков**

Зубообрабатывающие станки, предназначенные для обработки различных видов зубьев, имеют различные технологические характеристики в зависимости от диаметров обрабатываемых колес, длины и конфигурации зубьев, формообразующих движений (см. табл.1,2,3). Обработка зубчатых колес ведется по методу обката или копирования, причем обрабатывающий инструмент и заготовка образуют пару [4-7].

Таблица 1

Технологические характеристики зубострогальных станков для обработки и нарезания прямозубных колес

Параметр	5С263	527В	5С27П	5С280П
Максимальный диаметр	320	500	500	800
Максимальный модуль	8	12	12	12
Максимальная длина образующей начального конуса, при наклоне зуба 30%	150	265	220	400
Диаметр зуборезной головки	60;80;100 125;160; 200;250	160;200; 250;315; 400	160;200; 250;315; 400	160;200; 250;315; 400;500
Частота вращения зуборезной головки	20-155	20-155	20-155	20-155
Мощность электродвигателя	3	4	4	7,5

Таблица 2

Технологические характеристики зубострогальных станков для конических колес с круговыми зубьями

Параметр	5236П	5Т23В	5С268	5С277П	5С286П
Максимальный диаметр	125	125	320	500	800
Максимальный модуль	1,5	1,5	8	12	16
Максимальная ширина венца	20	16	16	80	125
Число двойных ходов в мин.	160-800	210-820	210-820	210-820	34-167
Частота вращения дисковых фрез			10,5-20	20-80	
Мощность электродвигателя	1,1	1,1	10	5,5	7,5

Таблица 3

Технологические характеристики зубодолбежных станков

Параметр	5111	5122	5122Б	5122В	5140	5М150	5М161
Максимальный диаметр заготовки	80	200	200	200	500	800	1250
Максимальная ширина зубчатого венца	20	50	30	50	100	160	160
Максимальная модуля	1	5	4,5	4,5	8	12	12
Диаметр долбяка	40	100	100	100	100	200	200
Число двойных ходов в мин.	250-1600	200-850	280-1200	200-850	65-450	33-188	33-212
Круговая подача мм/двойной ход	0,016-0,4	0,003-0,286	0,051-0,55	0,14-0,75	0,14-0,75	0,2-1,5	0,2-1,5
Мощность электродвигателя	1,1	2,1;3	3,7	2,1;3	4;4,5	4,8;5,7	4,8;5,7;7,5

Несмотря на различие технологических процессов зубодолбления, зубострогания, а также методов обката и копирования, теоретическое исследование процессов возбуждения вибраций и излучения, звуковой энергии может быть выполнено единым методологическим подходом [8,9].

## 2. Акустические модели, формирующиеся при данном виде зубообработки

Обрабатываемые зубчатые колеса устанавливаются на оправках, имеющих цилиндрическую форму. При любом способе центрирования обрабатываемые зубчатые колеса представляют собой круглые пластины, жестко закрепленные в центре. Используя данные теоретических исследований для зубчатых колес зависимость для расчета собственных частот колебаний приведены к виду

$$f_k = \frac{kh}{D} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\mu^2)'}}$$

где  $k$  – коэффициент, определяющий собственные частоты колебаний;  $h$  – длина зуба, м;  $D$  – диаметр окружности выступов, мм;  $E$  – модуль упругости, Па;  $\rho$  – плотность материала колеса, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

На машиностроительных предприятиях в подавляющем большинстве случаев обрабатываются стальные и чугунные колеса. Тогда подставляя величины механических параметров получены следующие зависимости для собственных частот колебаний

Сталь	$f_k = 3 \cdot 10^3 \frac{kh}{D}$
Чугун	$f_k = 2,4 \cdot 10^3 \frac{kh}{D}$

В зависимости от соотношения радиуса и длины волны в воздухе на собственных частотах колебаний. Тогда с учетом данных работ получены следующие зависимости для звукового давления ( $P$ ) и звуковой мощности ( $N$ ):

точечный источник (сталь)

$$P = 6 \cdot 10^3 \frac{DkhV_k}{r} \quad N = 6 \cdot 10^5 D^4 (hkV_k)^2$$

круглая пластина (сталь)

$$P = 3 \cdot 10^3 \frac{DkhV_k}{r} \quad N = 1,4 \cdot 10^5 D^4 (hkV_k)^2$$

точечный источник (чугун)

$$P = 4,5 \cdot 10^3 \frac{DkhV_k}{z} \quad N = 4,6 \cdot 10^5 D^4 (hkV_k)^2$$

круглая пластина (чугун)

$$P = 2,3 \cdot 10^3 \frac{DkhV_k}{z} \quad N = 1,1 \cdot 10^5 D^4 (hkV_k)^2$$

где  $V_k$  - скорость колебаний на собственных частотах, м/с;  $r$  - расстояние от источника акустического дискомфорта до рабочего места, м.

Результаты расчетов собственных частот колебаний зубчатых колес, представлены в табл. 4 и 5

Таблица 4

Собственные частоты колебаний чугунных колес

Геометрические параметры зубчатого колеса, D x h, (мм)	Собственные частоты колебаний										
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$	$f_9$	$f_{10}$	$f_{11}$
20 x 50	6000	12000									
50 x 50	2400	4800	7200	9600	12000						
80 x 100	3000	6000	7200	9000	12000						
125 x 100	1900	3300	5700	7600	9500	11400					
200 x 200	2400	4800	7200	9600							
200 x 160	1900	3800	5700	7600	9500	11400					
320 x 220	1650	3300	4950	6600	9500	3250	9900	11500			
320 x 180	1350	2700	4050	5400	6750	8100	9450	10800	12150		
500 x 300	1440	2880	4320	5760	7200	8640	10080	11520			
500 x 350	1680	3360	5040	6720	8400	10080	11760				
800 x 350	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	11000
1250 x 560	1100	2200	3300	4400	5500	6600	7700	8800	9900	11000	
3200 x 1350	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	11000

Таблица 5  
 Собственные частоты колебаний чугунных колес

Геометрические параметры зубчатого колеса, D x h, (мм)	Собственные частоты колебаний							
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$
20 x 50	7500							
50 x 50	5000	10000						
80 x 100	3750	7500	11250					
125 x 100	2400	4800	7200	9600	12000			
200 x 200	3000	6000	9000					
200 x 160	2400	4800	7200	9600				
320 x 220	2000	4000	6000	8000	10000			
320 x 180	1688	3376	5064	6752	8440	10128		
500 x 300	1800	3600	5400	7200	9000	10800		
500 x 350	2100	4200	6300	8400	10500			
800 x 350	1300	2600	3900	4200	6500	7800	9100	10400
1250 x 560	1344	2688	4032	6720	8064	9408		
3200 x 1350	1266	2532	3798	5064	6330	7596	8862	10128

Результаты расчетов показали, что зубчатые колеса имеют существенные различия в количестве собственных частот колебаний в нормируемом диапазоне частот. Причем практически у всех зубчатых колес собственные частоты попадают в средние и высокочастотный диапазон 100-11200 Гц.

Оправки, на которых центрируются обрабатываемые зубчатые колеса, различаются по способам закрепления на станках. В частности, при обработке на зубодолбежных и зубострогальных станках по методу обката оправки представляют собой консольно-закрепленные стержни. При обработке на зубошлифовальных и зубофрезерных станках, работающих по методу обкатки, оправки представляют собой круглые стальные стержни на двух опорах, которые, в свою очередь, следует рассматривать как шарнирно-опертые и жесткозакрепленные [2,10].

В качестве акустической модели любых оправок принят цилиндр ограниченной длины. Звуковое давление и звуковая мощность для трех вариантов закрепления приведены к следующему виду:

для шарнирно-опертой оправки

$$P = \frac{2,5 \cdot 10^2 D^3 V_k}{r} \left( \frac{k}{l} \right)^2 \quad N = \frac{3 \cdot 10^5 D^4 V_k^2 k^6}{l^5}$$

для консольно-закрепленной оправки

$$P = \frac{2,5 \cdot 10^2 D^3 V_k}{r} \left( \frac{2k-1}{l} \right)^2 \quad N = \frac{3 \cdot 10^5 D^4 V_k^2 (2k-1)^6}{l^5}$$

для жестко-закрепленной оправки

$$P = \frac{2,5 \cdot 10^2 D^3 V_k}{r} \left( \frac{2k+3}{l} \right)^2 \quad N = \frac{3 \cdot 10^5 D^4 V_k^2 (2k+3)^6}{l^5}$$

Уровни звукового давления и звуковой мощности, создаваемые технологической подсистемой «зубчатое колесо - оправка», на рабочих местах станочников, определяются следующим образом:

$$L_{p(N)} = 10 \lg(10^{0,1L_1} + 10^{0,1L_2})$$

где  $L_1$  и  $L_2$  – уровни звукового давления зубчатого колеса и оправки, дБ.

### Заключение

В приведенных выше зависимостях параметры технологических процессов, реализуемых на зубодолбежных и зубострогальных станках, будут учтены в зависимостях скоростей колебаний на собственных частотах. Эти данные позволяют теоретически рассчитывать спектральные уровни звукового давления зубодолбежных и зубострогальных станков на этапе их проектирования [11-13]. Фактически такие расчеты дают возможность определить акустическую эффективность проектируемых систем шумозащиты.

### Список литературы

1. Чукарин А.Н. Теория и метода акустических расчетов и проектирования технологических машин для механической обработки. Ростов н/Д, Издательский центр ДГТУ. – 2004. – 152 с.
2. Литвинов А.Е. Исследование режимов резания на ленточнопильных станках / А.Е. Литвинов, В.Г. Корниенко, Н.И. Сухонос // Станки Инструмент (СТИН). 2010. №10, С. 5-8.
3. Chukarin A.N., Beskopylny A.N., Isaev A.G. Studies of vibroacoustic characteristics in the operator's work area during abrasive treatment of welds // Work safety in industry. 2019. 11. – P. 7-12. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-11-7-12
4. Balanova M.V., Finochenko T.A., Pereverzev I.G. Physical factors affecting the reliability of rail crane operators. Dependability. 2019; 19 (1). P. 36-39. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2019-19-1-36-39>
5. Иванов Н.И., Никифоров А.С. Основы виброакустики. СПб.: Политехника. – 2000. – 482 с.
6. Общемашиностроительные нормативы режимов резани. Справочник: в 2-х т. / А.Д. Локтев, И.Ф. Гущин, В.А. Батуев и др. // М.: Машиностроение, 1999. – 640 с.
7. Theoretical study of the vibration excitation and noise generation processes of the grinding wheels of thread and spline grinding machines / Курченко П.С., Шашурин А.Е., Разаков Ж.П., Чукарин А.Е. // АКУСТИКА. 2021 Vol. 39. С.175-178. DOI 10.36336/akustika202139173.
8. Характеристики шумового дискомфорта в рабочей зоне прутковых токарных станков / Т.А. Финоченко, И.А. Яицков, А.Н. Чукарин, С.А. Раздорский // Российский научно-технический журнал «Мониторинг. Наука и Технология». – 2018.– № 3 – С. 10-13
9. Методика проведения экспериментальных исследований шума прутковых токарных автоматов / Т.А. Финоченко, А.Н. Чукарин // Инновационные технологии в машиностроении и металлургии: матер. IV Междунар. науч.-практ. конф. / Мин-во промышленности и энергетики. Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2012. С. 263–268.
10. Мотренко, Д.В. Моделирование виброакустической динамики режущего инструмента цепнодолбежных деревообрабатывающих станков / Д.В. Мотренко, И.А. Яицков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – Ростов н/Д: 2019, №2 (74). С. 37-42.

11. Разаков Ж.П. Теоретическое исследование процессов возбуждения вибраций и шумообразования шлифовальных кругов резьбо- и шлицешлифовальных станков / Разаков Ж.П., Шашурин А.Е., Курченко П.С., Иванов Н.И. // АКУСТИКА, Vol. 38, 2021, ISSN 1801-9064

12. Снижение шума металлорежущих станков / Т.А. Финоченко, Н.М. Яицкова, И.Г. Переверзев // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 2 (51). – С. 112–117.

13. Солдатов А.Г., Суворова Т.К., Финоченко Т.А., Чукарин А.Н., Теоретическое обоснование методов снижения шума и вибраций крупногабаритных шлифовальных кругов // ШУМ. Теория и практика шума. 2022. –Том. 8 – №2. – Р. 35-44

### References

1. Chukarin A.N. Theory and method of acoustic calculations and design of technological machines for machining. Rostov n/a, DSTU Publishing Center. - 2004. - 152 p.

2. Litvinov A.E. Study of cutting modes on band saw machines / A.E. Litvinov, V.G. Kornienko, N.I. Sukhonosov // Machine Tool (STIN). 2010. No. 10, pp. 5-8.

3. Chukarin A.N., Beskopylny A.N., Isaev A.G. Studies of vibroacoustic characteristics in the operator's work area during abrasive treatment of welds // Work safety in industry. 2019. 11. - R. 7-12. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-11-7-12

4. Balanova M.V., Finochenko T.A., Pereverzev I.G. Physical factors affecting the reliability of rail crane operators. Dependability. 2019; 19 (1). P 36-39. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2019-19-1-36-39> Ivanov N.I., Nikiforov A.S. Fundamentals of vibroacoustics. St. Petersburg: Polytechnic. - 2000. - 482 p.

5. Ivanov N.I.: Fundamentals of vibroacoustics / N.I. Ivanov, A.S. Nikiforov // St. Petersburg: Polytechnic, 482 p., 2020

6. General engineering standards for cutting modes. Directory: in 2 volumes / A.D. Loktev, I.F. Gushchin, V.A. Batuev and others // M.: Mashinostroenie, 19991. - 640 p.

7. Theoretical study of the vibration excitation and noise generation processes of the grinding wheels of thread and spline grinding machines / Курченко П.С., Шашурин А.Е., Разаков Ж.П., Чукарин А.Е. // АКУСТИКА. 2021 Vol. 39. С.175-178. DOI 10.36336/akustika202139173.

8. Characteristics of noise discomfort in the working area of bar lathes / Т.А. Finochenko, I.A. Yaitskov, A.N. Chukarin, S.A. Razdorsky // Russian scientific and technical journal "Monitoring. Science and Technology" 2018. № 3. P. 10-13

9. Methods for conducting experimental studies of the noise of bar lathe machines / Т.А. Finochenko, A.N. Chukarin // Innovative technologies in mechanical engineering and metallurgy: mater. IV Intern. scientific-practical. conf. / Ministry of Industry and Energy. Rostov-on-Don: Ed. center of DSTU, 2012, pp. 263–268.

10. Motrenko, D.V. Modeling of vibroacoustic dynamics of the cutting tool of chain grooving woodworking machines / D.V. Motrenko, I.A. Yaitskov // Bulletin of the Rostov State University of Communications. - Rostov n / a: 2019, No. 2 (74). pp. 37-42.

11. Razakov Zh.P. Theoretical study of the processes of excitation of vibrations and noise generation of grinding wheels of thread and spline grinders / Razakov Zh.P., Shashurin A.E., Kurchenko P.S., Ivanov N.I. // АКУСТИКА, Vol. 38, 2021, ISSN 1801-9064

12. Noise reduction of machine tools / Т.А. Finochenko, N.M. Yaitskova, I.G. Pereverzev // Proceedings of the Rostov State University of Communications. - 2020. - No. 2 (51). – S. 112–117.



13. Finochenko T. A., Chukarin A. N., Soldatov A. G., Suvorova T. K. Theoretical substantiation of methods for reducing noise and vibrations of large-sized grinding wheels // *NOISE Noise Theory and Practice*. 2022. Vol. 8 №2. P. 35-44