

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПЕРАТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ШУМОВОЙ ОБСТАНОВКИ НА РАБОЧИХ МЕСТАХ МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ И В КАБИНАХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

*Бараниченко В.В., Бедоидзе М.В., Сулименко А.С., Сулименко Д.С.,
Харахашьян А.М.*

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону

Ключевые слова: технологический процесс, кабины специализированного транспорта, шумовое поле, математическая модель, идентификация шумового спектра, оперативная диагностика, искусственный интеллект.

Аннотация. Предложена методика экспресс-диагностики шумового поля в рабочей зоне обрабатывающего оборудования и в кабинах технологических машин. Разработаны и реализованы в форме программного продукта эффективные алгоритмы квантификации шума. Результаты выполненных исследований вкупе с отработанными алгоритмическими решениями существенно расширяют возможности оперативной диагностики зашумления на рабочих местах в промышленности, дорожном и аграрном секторах.

ALGORITHMIC SOLUTIONS IN ON-FLY DIAGNOSTICS OF NOISE- IMPURITY AT LABOR ZONE AROUND TECHNOLOGICAL EQUIPMENT AND WITHIN CABINS OF INDUSTRIAL TRANSPORTATION VEHICLES

*Baranichenko V.V., Bedoidze M.V., Sulimenko A.S., Sulimenko D.S.,
Kharakhashyan A.M.*

Don State Technical University, Rostov-on-Don

Keywords: technology, industrial vehicle cabins, noise field, mathematical model, noise parameters identification, real-time diagnostics, artificial intelligence.

Abstract. An original technique for on-fly diagnostics of noise load on operator applicably to material working equipment and to technological vehicles is suggested. Few effective algorithms for noise parameters identification are elaborated and performed as a scientific-bulky soft. Results of the research and soft applied enable to diagnose noise field at different, labor condition in real time.

Шумовое поле в рабочей зоне современных производственных систем и в кабинах технологического транспорта не только выступает фактором вредности производственной среды, но также негативно сказывается на качестве конечной продукции [1]. Совокупность перечисленных обстоятельств обуславливает актуальность оперативной детальной диагностики шумовой обстановки с автоматизированной идентификацией критичных факторов и показателей. Поэтому целью данного исследования ставится разработка методики оперативной диагностики шумовой обстановки на рабочих местах в промышленности, строительстве и сельском хозяйстве. Для достижения этой цели авторами решаются следующие задачи: 1) разработки подробных математических моделей шумообразования в различных технологических процессах; 2) создания специализированного программного продукта, позволяющего идентифицировать шумовой спектр в рабочей зоне различных

производств; 3) сопоставления расчетных и экспериментальных шумовых спектров; 4) конструирования и обучения нейросетей для оперативной диагностики шумовой обстановки. Для первичной отработки подхода объектом анализа выбран распил крупногабаритной древесины циркулярным инструментом. Ниже подробно опишем предлагаемые нами методы и полученные результаты.

Общей моделью свободных колебаний пильного диска является следующая [2]:

$$\frac{\partial^2 F(r, \varphi, t)}{\partial t^2} + \varepsilon \frac{\partial F(r, \varphi, t)}{\partial t} + \frac{\varepsilon^2}{4} F(r, \varphi, t) + \frac{D}{\rho h} \left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right]^2,$$

$$F(r, \varphi, t) = 0, \tag{1}$$

где $F(r, \varphi, t)$ – смещение пластины; ε – коэффициент затухания; r – расстояние от центра ($0 \leq r \leq R$); φ – угол, отсчитываемый от положения равновесия ($0 \leq \varphi \leq 2\pi$); ρ – плотность материала (в нашем случае стали); t – время.

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} - \text{цилиндрическая жёсткость; где } E - \text{модуль Юнга;}$$

h – толщина пластины; $\mu \approx 0.25 \div 0.3$ – коэффициент Пуассона.

После замены переменных

$$F(r, \varphi, t) = G(r, \varphi, t) e^{-\frac{\varepsilon}{2} t}, \tag{2}$$

получаем:

$$\frac{\partial^2 G(r, \varphi, t)}{\partial t^2} + \frac{Eh^2}{12\rho(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right]^2 G(r, \varphi, t) = 0. \tag{3}$$

Оценка параметров колебания диска показывает, что величина ε мала и

$$F(r, \varphi, t) = G(r, \varphi, t). \tag{4}$$

Модель (3) отвечает свободным колебаниям пильного диска, а описание процесса резания требует добавить источник $f(r, t)$ ударного возбуждения со стороны режущей поверхности (зубьев).

Общее решение уравнения (3) представимо $G(r, \varphi, t)$ в виде:

$$G(r, \varphi, t) = \mathfrak{R}(r) \cdot \Phi(\varphi) \cdot T(t). \tag{5}$$

В работе [2] показано, что общее решение для координатной функции имеет вид:

$$\mathfrak{R}(r) = \sum_{n=0}^{\infty} \mathfrak{R}_n(r), \tag{6}$$

где

$$\mathfrak{R}_n(r) = \mathfrak{R}_n^+(r) + \mathfrak{R}_n^-(r) = C_{1n} I_n \left(\sqrt[4]{\frac{12\rho(1-\mu^2)}{Eh^2}} \cdot \sqrt{\omega} \cdot r \right) + C_{2n} J_n \left(\sqrt[4]{\frac{12\rho(1-\mu^2)}{Eh^2}} \cdot \sqrt{\omega} \cdot r \right). \tag{7}$$

В формуле (10) $J_n(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \cos\left(x - \frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{2}n\right)$ – функция Бесселя первого

рода; $I_n(x) \sim \frac{e^x}{\sqrt{2\pi x}}$ – функция Инфельда [3].

Рассматривая установившийся режим в форме

$$f(r) = \delta(r - R), \quad (8)$$

получаем частное решение

$$G(r, t) = \frac{1}{4\pi^2} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mathfrak{R}_n(R)}{\omega_n^2 - \omega^2} \right] e^{-2\pi i \omega t}. \quad (9)$$

где ω – частота ударного воздействия на зубья.

При возмущении (8) спектр технологического шума описывается зависимостью

$$\left(\frac{\mathfrak{R}_n(R)}{\omega_n^2 - \omega^2} \right)^2 (\omega_n). \quad (10)$$

Если привязаться к типичным параметрам оборудования и процесса

$$R \approx 0.7 \text{ м}, h \approx 2 \text{ мм}, E = 200 \cdot 10^9 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}^2}, \rho = 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \mu = 0.25,$$

$$\omega = \frac{\lambda^2}{R^2} \sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho(1-\mu^2)}} = \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\mu^2)}} \frac{h\lambda^2}{R^2} = \left\{ \begin{array}{l} R \approx 0.7 \text{ м} \\ h \approx 2 \text{ мм} \\ E = 200 \cdot 10^9 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}^2} \\ \rho = 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \\ \mu = 0.25 \end{array} \right\} =$$

$$= \sqrt{\frac{200 \cdot 10^9 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}^2}}{12 \cdot 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot (1 - 0.25^2)}} \cdot \frac{0.002}{0.7} \lambda^2, \quad (11)$$

$$\omega_0 \approx 4,3 \frac{1}{\text{с}} = 2\pi f_0 \quad f_0 = \frac{4,3}{2\pi} = 0,69 \text{ Гц}$$

и ограничиться нормируемым СанПиН диапазоном частот, получаем:

$$31.25 \text{ Гц} \leq f < 8000 \text{ Гц}, \quad 31.25 \text{ Гц} \leq f_0 \lambda^2 < 8000 \text{ Гц},$$

$$43 \leq \lambda^2 < 11600 \Rightarrow 6,5 < \lambda < 108.$$

Т.е. практически достаточно ограничиться учетом сотни радиальных колебательных мод.

Вторая задача решалась путем регистрации производственного шума посредством микрофона, соединенного с ПК. Записанный wav-файл обрабатывался быстрым Фурье-преобразованием (БПФ) [4]. В исследовательских целях фиксировался шум шести режимов: холостой ход, а также пиление брусьев

размерами 25×25 мм и 50×50 мм при частоте вращения вала 1500 и 3000 мин⁻¹. Использование в анализе холостого хода позволяет принципиально исключить из рассмотрения шум, обусловленный электроприводом.

Сопоставление результатов компьютерного моделирования и экспериментальной фиксации шумового спектра [5] для типичного режима пиления приводится на рисунке 1. Представленные данные свидетельствуют о хорошем согласии модели с фактическими данными (низкочастотная часть спектра обусловлена шумом электродвигателя). Кроме того, опытным путем установлена стационарность шумового спектра, о чем свидетельствует мел-спектрограмма на рисунке 2.

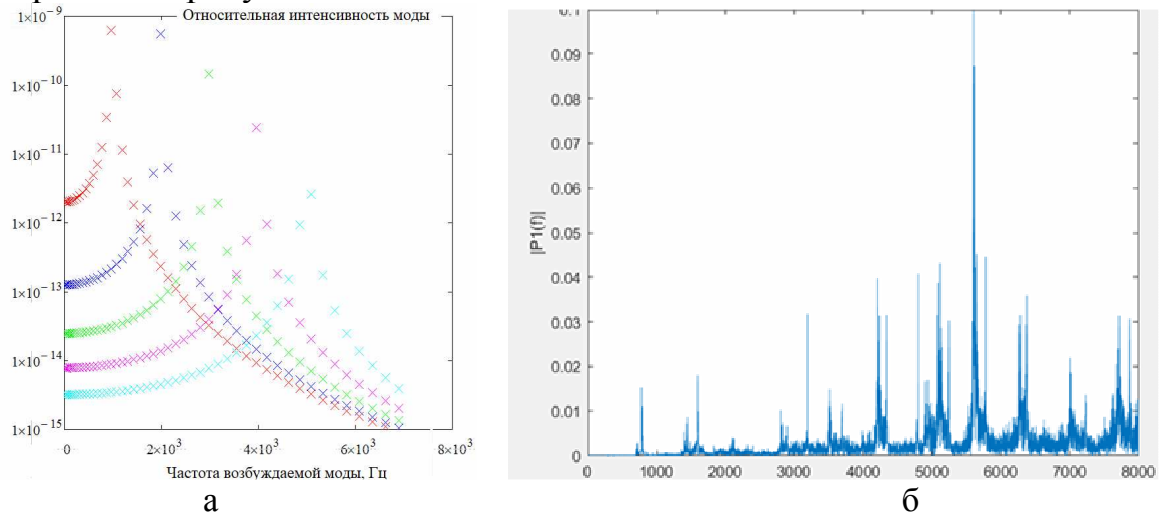


Рис. 1. Синтетический (а) и реальный (б) спектры шума циркулярной пилы; синтетические спектры соответствуют частоте возбуждения $\omega = 1000, 2000, \dots, 5000$ Гц; реальный спектр отвечает пилению рейки толщиной 5 см при частоте вращения 1500 мин⁻¹

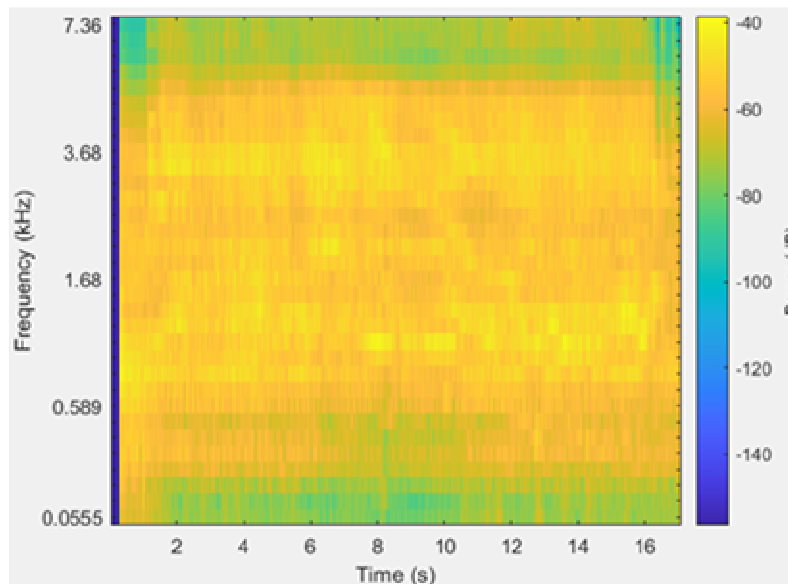


Рис. 2. Мел-спектрограммы пиления рейки толщиной 5 см при частоте вращения 1500 мин⁻¹

Результаты соответствующего компьютерного моделирования при возбуждающей частоте $\omega = 1000, 2000, \dots, 5000$ Гц показаны на рисунке 1. Как свидетельствуют результаты расчетов, спектр технологического шума в данном

случае является сравнительно узкополосным и определяется частотой ударного воздействия на диск пилы.

Чтобы автоматизировать диагностику шумовой обстановки на рабочих местах в данной работе сконструирована нейросеть, структура которой показана на рисунке 3.

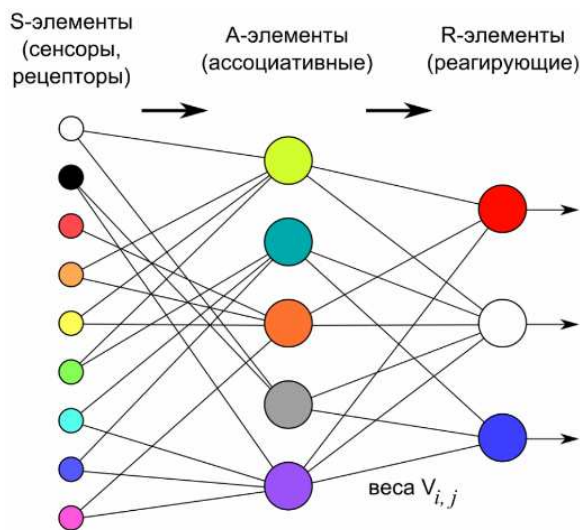


Рис. 3. Выбранная конфигурация нейросети

Для обучения нейросети использовались 18 аудиозаписей распила реек размерами 25×25 мм и 50×50 мм, а также холостого хода на двух скоростях. Для проверки качества ее работы предъявлялись еще 12 подобных аудиозаписей. «Обучаемость» и точность работы нейросети проиллюстрированы на рисунке 4. Приведенные данные свидетельствуют, что длина обучающей выборки достаточна. Это обусловлено стационарностью шума как случайного процесса (рис. 2).

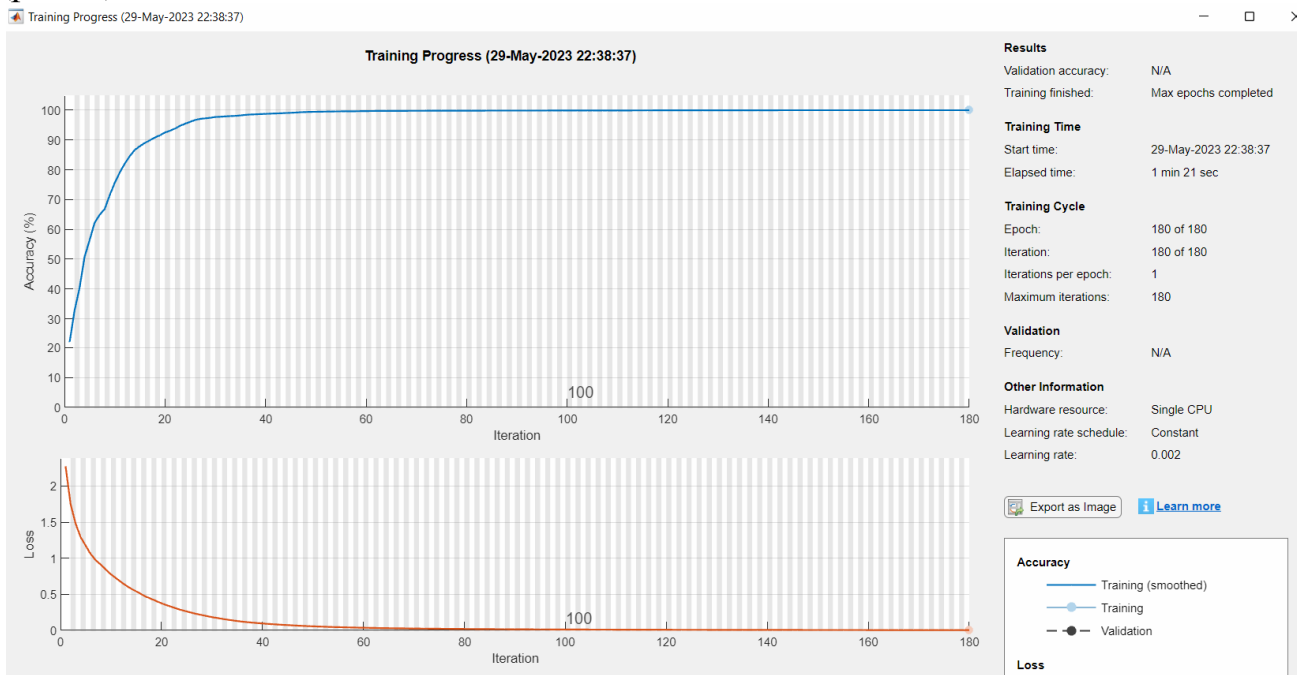


Рис. 4. Динамика обучаемость нейронной сети

Неизбежные ошибки распознавания нейросетью отражены на рисунке 5. Их природа, вероятно, в том, что данный технологический шум не истинно, а

квазистационарен. Количественно оценить погрешность автоматизированной идентификации шума нейросетью позволяют данные, собранные в таблице.

Очевидно, ошибочность ее работы напрямую связана с мерой не стационарности анализируемого шума.

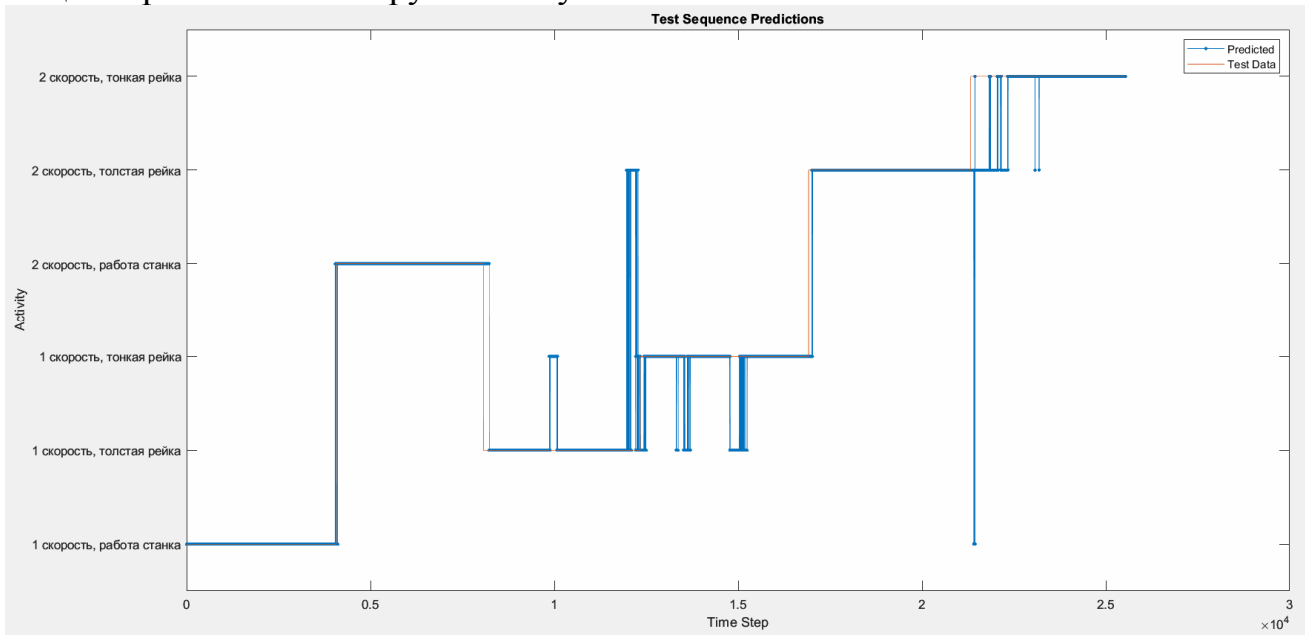


Рис. 5. Ошибки в работе нейросети

Табл. 1. Числовая оценка надежности нейросетевой идентификации технологического шума при распиле древесины

True Class \ Predicted Class	1 скорость, работа станка	1 скорость, толстая рейка	1 скорость, тонкая рейка	2 скорость, работа станка	2 скорость, толстая рейка	2 скорость, тонкая рейка
1 скорость, работа станка	4041			19		
1 скорость, толстая рейка		3601	275	159	225	
1 скорость, тонкая рейка		574	4011			
2 скорость, работа станка	30			3980		
2 скорость, толстая рейка			97		4313	
2 скорость, тонкая рейка	7				901	3302

Заключение. Разработана математическая модель шумообразования во время пиления древесины циркулярной пилой. Создан специализированный программный продукт, позволяющий идентифицировать шумовой спектр в рабочей зоне пильщиков при помощи ПК. Выполнено сопоставление расчетных и экспериментальных шумовых спектров. Сконструирована и обучена нейросеть в целях оперативной диагностики шумовой обстановки. Исследованы аналитические возможности специализированной нейросети: установлено, что благодаря специфике изучаемого технологического шума обучающие выборки

могут быть достаточно компактными. Также выяснилось, что предложенная математическая модель шумности лесопильного процесса (циркулярным инструментом) достаточно подробна и может использоваться как надежный информационный элемент соответствующего цифрового двойника.

Список литературы

1. СН2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы СН от 31.10.1996 п. 2.2.4/2.1.8.562-96.
2. Старжинский В.Н., Завьялов А.Ю., Совина С.В. Теоретические положения излучения шума пильным диском при резании древесины // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 3. – С. 50.
3. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – 13-е изд., испр. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 544 с.
4. Кандидов В.П., Чесноков С.С., Шленов С.А. Дискретное преобразование Фурье. Учебное пособие. – М.: Физический факультет МГУ, 2019. – 88 с.
5. Солонина А.И., Улахович Д.А., Арбузов С.М., Соловьева Е.Б. Основы цифровой обработки сигналов: Курс лекций. – 2-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 768 с.

Сведения об авторах:

Бараниченко Вадим Владимирович – аспирант;

Бедоидзе Мария Васильевна – аспирант;

Сулименко Андрей Сергеевич – бакалавр;

Сулименко Денис Сергеевич – бакалавр;

Харахашьян Артем Михайлович – к.т.н., доцент кафедры «Прикладная математика».