

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR MECHANICAL AND PHYSICAL-TECHNICAL PROCESSING

Научная статья

УДК 621.19

DOI: 10.26730/1999-4125-2023-5-15-22

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ ВИБРОАКУСТИКИ ДЛЯ АКТИВНОГО КОНТРОЛЯ ВОЛНИСТОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ

Овсянников Виктор Евгеньевич, Некрасов Роман Юрьевич,  
Ковенский Илья Моисеевич

Тюменский индустриальный университет

\*для корреспонденции: vik9800@mail.ru

### Аннотация.

Данная статья посвящена вопросам автоматического обеспечения параметров поверхностного слоя, а конкретно волнистости поверхности. При обработке на станках с числовым программным управлением используется метод получения требуемых выходных параметров посредством настройки станка (т.е. получение выходных параметров реализуется автоматически). Однако отклонения от нормального протекания процесса вызывают брак. Поэтому для надежного обеспечения заданных параметров качества обработки, в том числе волнистости, нужно реализовать автоматический контроль. В статье рассматривается возможность применения виброакустического сигнала как диагностического признака, который можно использовать для оценки параметров волнистости при обработке на станках с числовым программным управлением. В качестве исходной взята токарная обработка. При этом образование волнистости рассматривается с точки зрения кибернетического подхода с разделением профиля на систематическую и случайную составляющие. Систематическая составляющая образуется преимущественно под влиянием кинематики процесса резания и геометрии режущего инструмента. Случайная компонента вызвана прежде всего вибрациями технологической системы. В качестве обрабатываемых материалов рассматриваются конструкционные стали. Был проведен анализ текстуры профиля волнистости поверхности, который показал, что в ней преобладает составляющая, которая порождена низкочастотной составляющей колебаний технологической системы. Анализ профиля выполнялся с использованием методов корреляционного анализа и фрактальной геометрии. Посредством корреляционного анализа вычислялся уровень случайной компоненты. При фрактальном анализе вычислялась величина размерности через сопряженную с ней величину – показатель Херста. Обоснован выбор частотного диапазона вибросигнала, который обладает наибольшей информативностью в части оценки волнистости. Также приведено



### Информация о статье

Поступила:

29 августа 2023 г.

Одобрена после

рецензирования:

20 ноября 2023 г.

Принята к публикации:

22 ноября 2023 г.

Опубликована:

05 декабря 2023 г.

### Ключевые слова:

волнистость, текстура,  
вибрации, сигнал, точение

*обоснование использования показателя Херста (определяемого по вибросигналу) как оценочного параметра при активном контроле волнистости*

**Для цитирования:** Овсянников В.Е., Некрасов Р.Ю., Ковенский И.М. Перспективы использования сигналов виброакустики для активного контроля волнистости при обработке на токарных станках с ЧПУ // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. № 5 (159). С. 15-22. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-5-15-22, EDN: ZCCRLU

### Введение.

При токарной обработке, в частности на станках с числовым программным управлением помимо шероховатости поверхности, формируется также и волнистость. Согласно современным представлениям о процессе обработки [1-3], главной причиной данного явления (образования волнистости) являются нежелательные перемещения элементов технологической системы, которые порождены недостаточной жесткостью. Данные процессы вызывают образование волн, которые зависят от частоты вращения заготовки и колебаний инструмента. При этом взаимосвязь имеет следующий вид [4]:

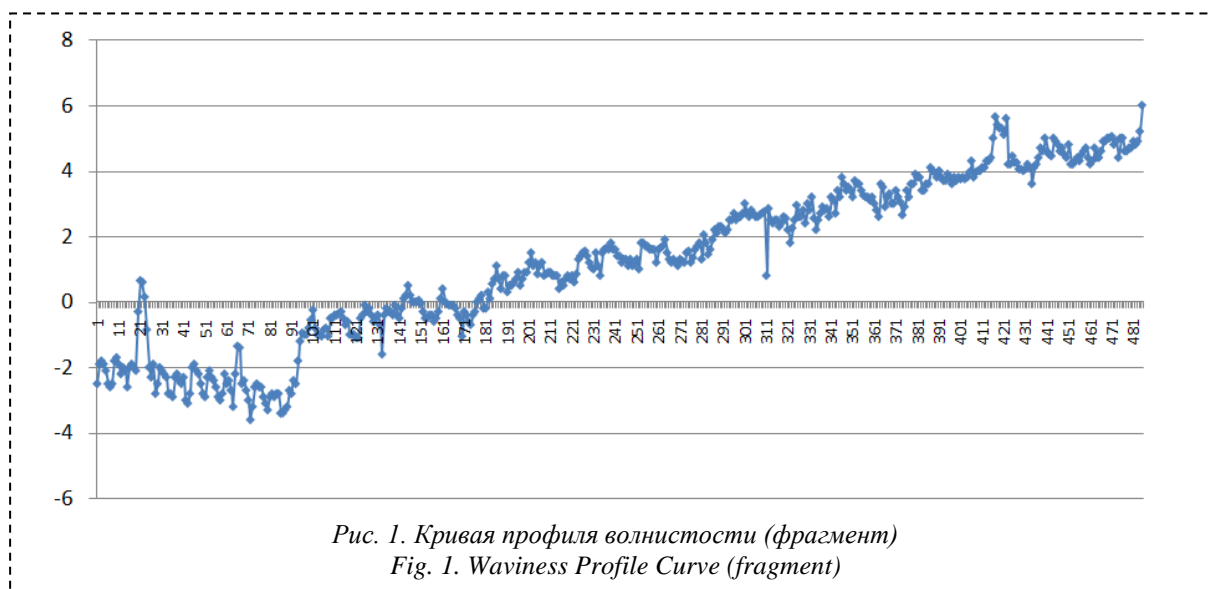
$$v/\omega = i \pm \lambda, \quad (1)$$

где  $v$  – частота колебаний инструмента;

$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$  – составляющая, которая зависит от частоты вращения заготовки;

$n$  – частота вращения заготовки;

$i, \lambda$  – параметры получаемых волн.



При этом волны образуются как в продольном, так и в поперечном направлении. Важным аспектом, который надо учитывать при решении задачи технологического обеспечения требований чертежа по волнистости, являются процессы, которые формируют конечную текстуру профиля обработанной поверхности (составляющую волнистости). Как сказано выше, причиной появления волн на поверхности заготовки являются упругие деформации элементов технологической системы, которые физически проявляются в виде колебаний.

Исследованиями [5-8] установлено, что формирование шероховатости поверхности идет за счет высокочастотной составляющей колебаний, частота которых превышает 5 кГц. При этом колебания, которые порождают волнистость, находятся в частотном диапазоне от 0.3 кГц до 5 кГц. Колебания с частотами менее 0.3 кГц оказывают влияние на погрешность формы в продольном и поперечном сечениях.

Таким образом, можно сказать, что итоговый профиль волнистости состоит из двух элементов, которые можно условно назвать систематической составляющей (в большей степени порождается кинематикой процесса, в нашем случае зависит от автоколебаний) и

случайной (порождается флуктуациями, т.е. резкими изменениями параметров процесса). Знание количественного вклада каждой из составляющих в результирующую текстуру профиля дает возможность правильного выбора стратегии обработки и корректного применения решений в части мониторинга и управления процессом, что особенно важно при использовании оборудования с числовым программным управлением.

**Методы исследования.**

В качестве исходных данных использовались поверхности деталей, которые были обработаны чистовым точением. В качестве обрабатываемых материалов были использованы низколегированные стали марок 40X и 40XH с твердостью до 40 единиц по Роквеллу. Измерения профиля осуществлялись при помощи профилографа-профилометра модели 252 с последующей оцифровкой данных вручную с занесением данных в MS EXCEL. Пример кривой профиля приведен на Рис. 1. По оси абсцисс отложен номер точки измерения, по оси ординат – высотные значения.

Исследование текстуры профиля волнистости поверхностей производилось на основе выполнения корреляционного анализа [9,10] и фрактальной геометрии [11-13]. При проведении корреляционного анализа исследуемый профиль представлялся в виде следующего преобразования:

$$K_{xx}(\tau) = \frac{1}{l-\tau} \sum_{i=0}^{l-\tau} x(i)x(i+\tau), \tag{2}$$

где  $\tau$  – заданная величина временной задержки, которая определяет сдвиг по оси абсцисс при вычислениях.

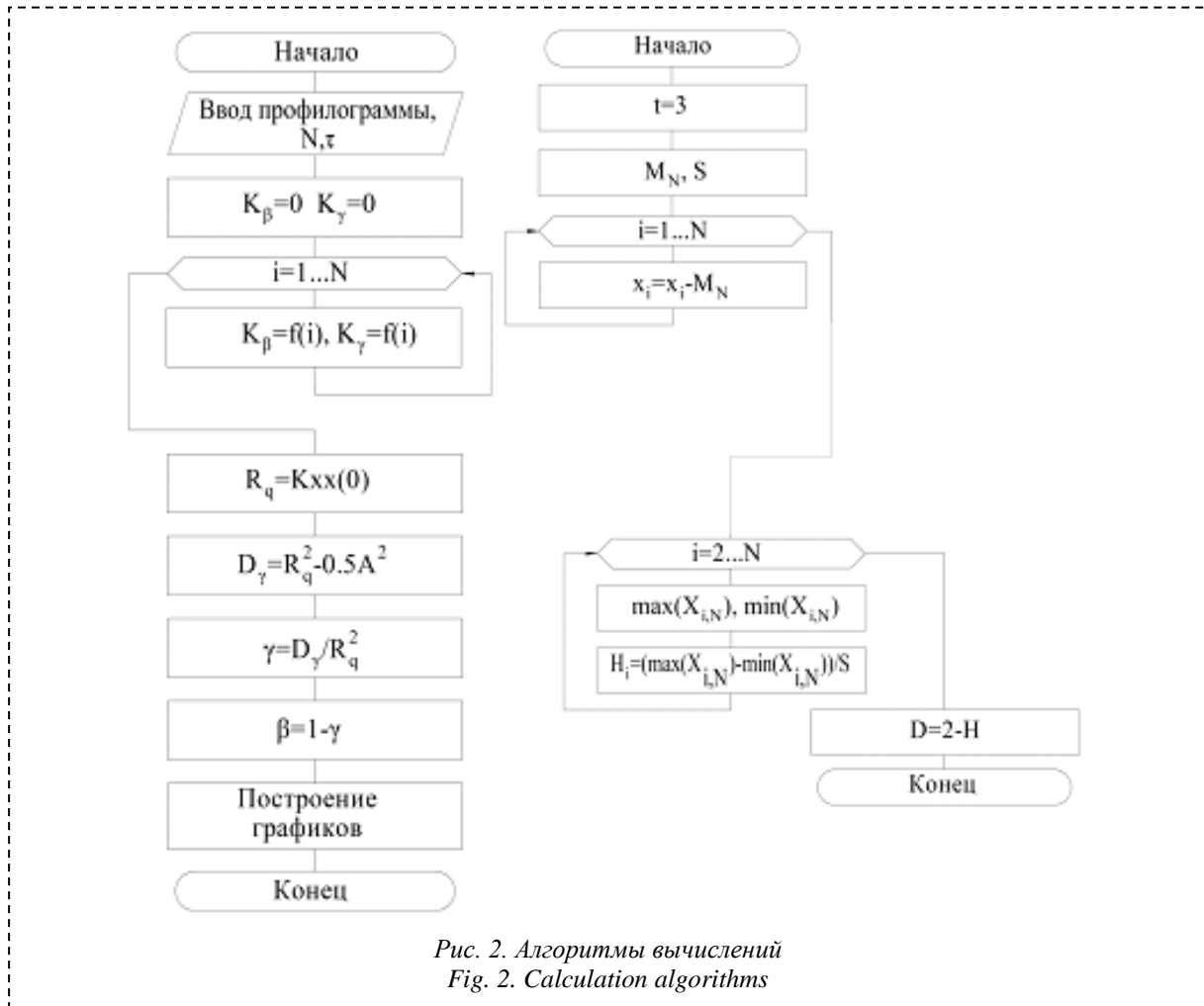


Рис. 2. Алгоритмы вычислений  
Fig. 2. Calculation algorithms

Уровень случайной составляющей в текстуре анализируемого профиля волнистости можно определить через значения дисперсии случайной составляющей  $D_\gamma$  и ее амплитудного значения  $A$ , используя следующее выражение:

$$\gamma = \frac{D\gamma}{R_q^2} \quad (3)$$

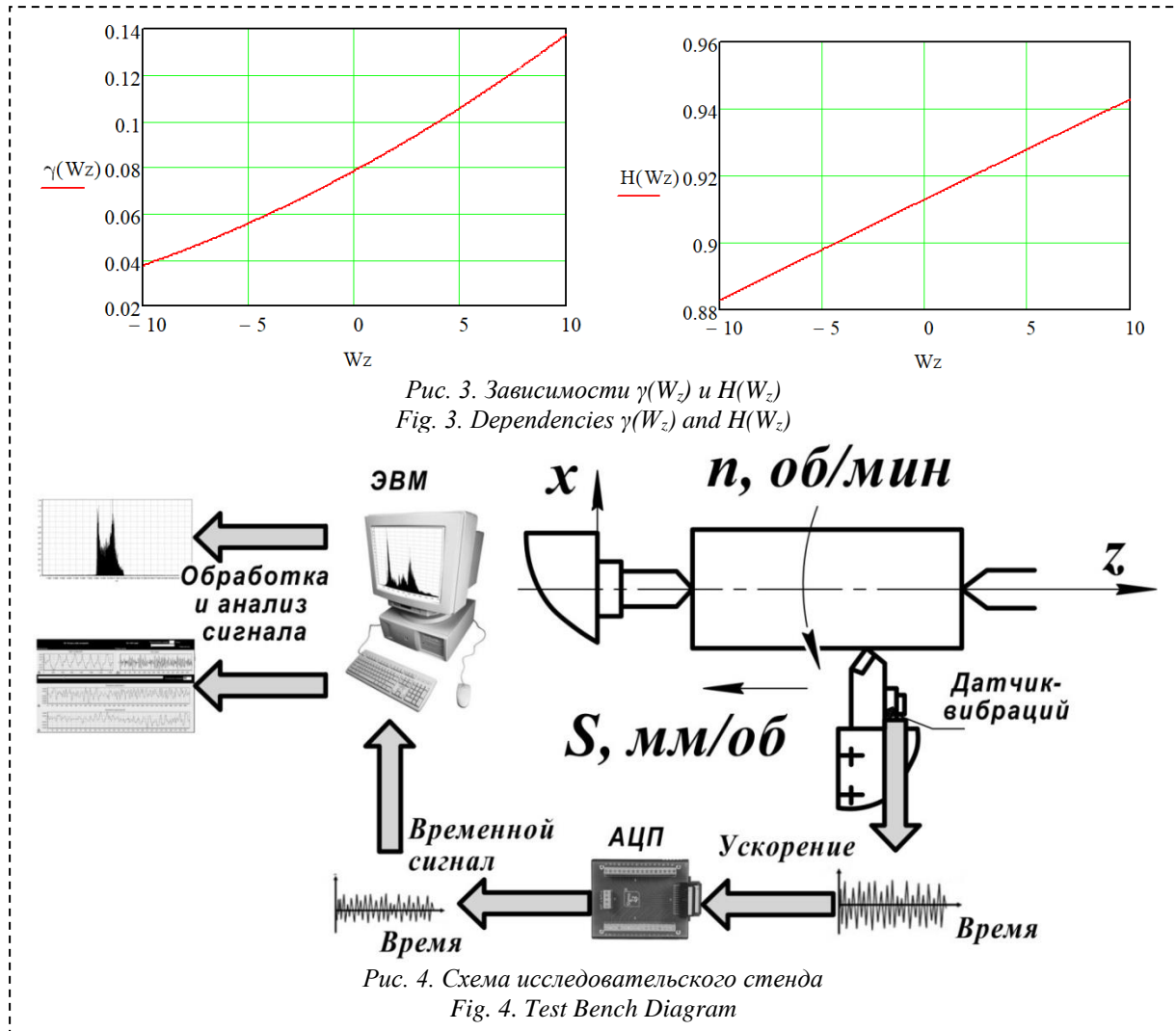
где  $D\gamma = Rq^2 - 0.5A^2$ ,  $A = \frac{S^2}{8r}$

$S$  – продольная подача, мм/об,  $r$  – радиус при вершине режущей пластины.

Среднеквадратическое отклонение связано с корреляционной функцией профиля следующим образом:

$$R_q = K_{XX}(0), \quad (4)$$

Зная уровень случайной составляющей  $\gamma$ , можно определить уровень систематической



составляющей  $\beta$  через соотношение вида:

$$\beta = 1 - \gamma \quad (5)$$

Для определения величины фрактальной размерности  $D$  профиля волнистости поверхностей были использованы формулы, приведенные в источниках [14,15].

$$D = 2 - H, \quad (6)$$

где  $H$  – показатель Харста, который определяется итерационным методом при помощи усреднения величины нормированного размаха по следующей формуле:

$$H = \log\left(\frac{R_t}{S_t}\right) = f(\log(N)), \quad (7)$$

где  $t$  – временной параметр, который принимает значения 3,4,5,...,N-1.

Величина  $R_t$  и  $S_t$  определяются следующим образом [14,15]:

$$R_t = \text{Max}(X_{t,N}) - \text{Min}(X_{t,N}) \quad (8)$$

$$S = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N (x_i - M_N)^2 \quad (9)$$

На рис. 2 приведены алгоритмы вычислений.

### Результаты.

В результате проведенных вычислений были получены следующие эмпирические зависимости:

$$\gamma = 8.93 \cdot 10^{-5} \cdot W_z^2 + 0.005 \cdot W_z + 0.0785, \quad (10)$$

где  $W_z$  – высота профиля волнистости по 10 точкам.

$$H = -1.79 \cdot 10^{-6} \cdot W_z^2 + 0.003 \cdot W_z + 0.913, \quad (11)$$

Коэффициент детерминации для зависимостей (10) и (11) превышает 0.92, что говорит о корректности полученных результатов.

Графически зависимости (10) и (11) приведены на Рис. 3. Величина  $W_z$  измеряется в мкм.

Анализируя зависимости (10) и (11), можно сказать, что доля систематической составляющей в текстуре профиля превышает 90%. Это подтверждает приведенный выше тезис о доминирующей роли автоколебаний в формировании профиля волнистости поверхности. Однако решение задачи технологического обеспечения волнистости поверхности осложняется тем, что данные колебания могут перейти в неустойчивое состояние, что приведет к возникновению брака.

Поэтому перспективным в данном случае представляется использование виброакустических сигналов с целью активного контроля волнистости при обработке на станках с числовым программным управлением. Для выполнения исследований был создан стенд на базе станка с числовым программным управлением марки ИБ11Ф3. Схема стенда приведена на Рис. 4.

Сигнал записывался при помощи датчика вибраций (акселерометра), который закреплялся при помощи магнита непосредственно на державку токарного резца. Далее через соответствующие преобразователи записанный сигнал преобразовывался в формат wav (звуковой файл). Дальнейшая обработка сигнала выполнялась с использованием авторского программного обеспечения. При этом сигнал подвергался фильтрации в различных частотных диапазонах, выполнялся спектральный анализ, а также вычисления показателя Харста для вибросигнала. Пример спектра вибраций сигнала после фильтрации приведен на Рис. 5.

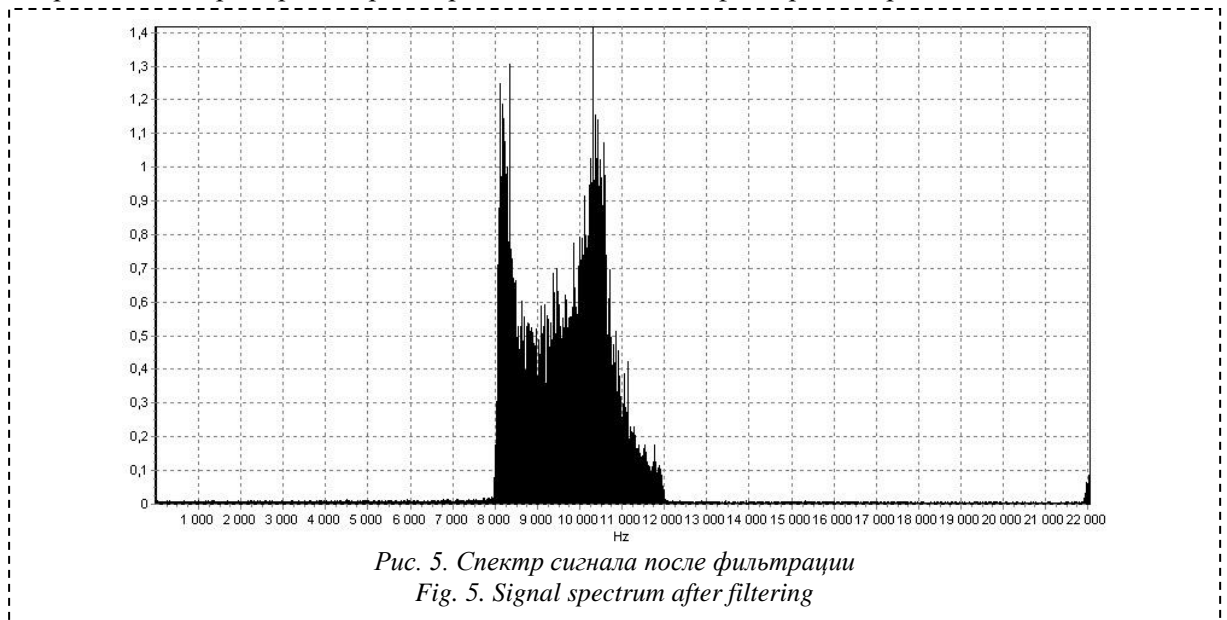


Рис. 5. Спектр сигнала после фильтрации  
Fig. 5. Signal spectrum after filtering

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безъязычный В. Ф. Метод подобия в технологии машиностроения: монография. М. : Инфра-инженерия, 2021. 356 с.
2. Ovsyannikov V., Nekrasov R., Putilova U., Il'yaschenko D., Verkhoturova E. On the issue of automatic form accuracy during processing on cnc machines. Revista Facultad de Ingenieria. 2022. № 103. Pp. 88–95.
3. Banja L. Hrnjica S. Modeling of the Roughness of the Aluminium Element Surface Processed on a CNC Machine. Conference: DEMI 2023 16th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering. 2023. Pp. 162–168.

4. Грубый С. В. Имитационное моделирование процессов резания и изнашивания инструмента // Вестник машиностроения. 2007. №7. С. 38–42.
5. Гузенко В. С., Цыганаш В. Е. Выбор метода обработки сигналов, характеризующих процессы в зоне резания // Резание и инструмент в технологических системах. Вып. 68. Харьков : НТУ «ХПИ», 2005. С. 153–160.
6. Lijie M., Howard I., Minghua P., Zhankui W., Jianxiu S. Experimental Investigation of Cutting Vibration during Micro-End-Milling of the Straight Groove. *Micromachines* 2020, 11, 494; doi:10.3390/mi11050494. P. 1032–1044.
7. Liu R.; Wu S.; Yang L.; Yue C.; Liu X. A prediction method of milling chatter stability for complex surface mold. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016, 89, 2637–2648.
8. Ko J. H.; Shaw K. C.; Chua H. K.; Lin R. M. Cusp error reduction under high speed micro/meso-scale milling with ultrasonic vibration assistance. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2011, 12, 15–20.
9. Дунин-Барковский И. В., Карташова А. Н. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. М. : Машиностроение, 1978. 232 с.
10. Thomas T. R. *Rough surfaces* / T.R. Thomas. London: Imperial College Press, 1999. 278 p.
11. Мусалимов В. М., Валетов В. А. Динамика фрикционного взаимодействия. СПб. : СПбГУ ИТМО, 2006. 191 с.
12. Ogar P. M. Gorokhov D. B. Influence of Materials Hardenability Parameters on the Machine Parts Characteristics after Unloading. *Key Engineering Materials.* 2016. V. 723. pp. 369–375.
13. Ogar P. M. Gorokhov D. B. Meyer law application for solving problems of surface plastic deformation by spherical indentation. *Applied Mechanics and Materials.* 2015. V. 788. Pp. 199–204.
14. Остапчук А. К., Овсянников В. Е. Применение теории фракталов в математическом моделировании и технике: Учебное пособие. Курган : издательство КГУ, 2009. 64 с.
15. Binnig, G., Rohrer H., Gerber C., Weibel E. Surface studies by scanning tunneling microscopy // *Phys. Rev.Lett.* 1982. Vol. 49, № 1.P. 57–61.

© 2023 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*Об авторах:*

Овсянников Виктор Евгеньевич, доктор технических наук профессор кафедры «Технология машиностроения», Тюменский индустриальный университет, (625000, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, 38), e-mail: vik9800@mail.ru

Некрасов Роман Юрьевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Технология машиностроения», Тюменский индустриальный университет, (625000, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, 38), e-mail: suncler@mail.ru

Ковенский Илья Моисеевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение», Тюменский индустриальный университет, (625000, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, 38), e-mail: kovenskijim@tyuiu.ru

*Заявленный вклад авторов:*

Овсянников Виктор Евгеньевич – постановка задачи, организация и проведение исследований.

Некрасов Роман Юрьевич – обзор литературы по теме исследования, сбор и анализ данных, написание текста.

Ковенский Илья Моисеевич – научный менеджмент, анализ данных, выводы.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Original article

### PROSPECTS FOR USING VIBROACOUSTIC SIGNALS FOR ACTIVE WAVE CONTROL IN CNC MACHINES

**Viktor E. Ovsyannikov, Roman Yu. Nekrasov, Ilya M. Kovensky**

Tyumen Industrial University



\*for correspondence: vik9800@mail.ru

**Article info**

Received:

29 August 2023

Accepted for publication:

20 November 2023

Accepted:

22 November 2023

Published:

05 December 2023

**Keywords:** waviness, texture, vibrations, signal, turning.**Abstract.**

This article is devoted to the issues of automatic provision of surface layer parameters, specifically surface waviness. When machining on numerically controlled machines, the method of obtaining the required output parameters by means of machine setup is used (i.e., obtaining the output parameters is implemented automatically). However, fluctuations in the normal process flow cause defects. Therefore, in order to reliably ensure the specified parameters of machining quality, including waviness, it is necessary to implement automatic control. The article considers the possibility of using the vibroacoustic signal as a diagnostic sign, which can be used to estimate the parameters of waviness during machining on numerically controlled machine tools. Turning machining is taken as the initial one. In this case, the formation of waviness is considered in terms of the cybernetic approach with the separation of the profile into systematic and random components. The systematic component is formed mainly under the influence of the kinematics of the cutting process and cutting tool geometry. The random component is primarily caused by vibrations of the process system. Structural steels are considered as machined materials. The texture of the surface undulation profile was analyzed, which showed that it is dominated by the component that is generated by the low-frequency component of vibrations of the technological system. The profile analysis was performed using correlation analysis and fractal geometry techniques. Through correlation analysis, the level of the random component was calculated. In fractal analysis, the dimensionality value was calculated through its conjugate value - Hurst index. The choice of the frequency range of the vibration signal, which has the greatest informativeness in the part of undulations estimation, was justified. The justification of using the Hurst index (determined by the vibration signal) as an estimation parameter for active control of waviness is also given.

**For citation:** Ovsyannikov V.E., Nekrasov R.Yu., Kovensky I.M. Prospects for using vibroacoustic signals for active wave control in CNC machines. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2023; 5(159):15-22. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2023-5-15-22, EDN: ZCCRLU

**REFERENCES**

1. Bez'yazychnyj V.F. Metod podobiya v tekhnologii mashinostroeniya: monografiya [Similarity method in mechanical engineering technology]. V.F. Bez'yazychnyj. M.: Infra-inzheneriya; 2021.
2. Ovsyannikov V., Nekrasov R., Putilova U., Il'yaschenko D., Verkhoturova E. On the issue of automatic form accuracy during processing on cnc machines. *Revista Facultad de Ingenieria*. 2022; 103:88–95.
3. Banja L., Hrnjica S. Modeling of the Roughness of the Aluminium Element Surface Processed on a CNC Machine. Conference: DEMI 2023 16th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering. 2023. Pp. 162–168.
4. Grubiy S.V. Imitacionnoe modelirovanie processov rezaniya i iznashivaniya instrumenta [Simulation of tool cutting and wear processes. *Bulletin of Mechanical Engineering*]. *Vestnik mashinostroeniya*. 2007; 7:38–42.
5. Guzenko V.S., Cyganash V.E. Vybora metoda obrabotki signalov, harakterizuyushchih processy v zone rezaniya [Selection of signal processing method characterizing processes in the cutting zone]. *Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemah*. Vyp. 68. Har'kov: NTU «HPI»; 2005. Pp. 153–160.
6. Lijie M., Howard I., Minghua P., Zhankui W., Jianxiu S. Experimental Investigation of Cutting Vibration during Micro-End-Milling of the Straight Groove. *Micromachines*. 2020; 11:494. doi:10.3390/mi11050494. P. 1032-1044.
7. Liu R.; Wu S.; Yang L.; Yue C.; Liu X. A prediction method of milling chatter stability for complex surface mold. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016; 89:2637–2648.
8. Ko J.H.; Shaw K.C.; Chua H.K.; Lin R.M. Cusp error reduction under high speed micro/mesoscale milling with ultrasonic vibration assistance. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2011; 12:15–20.
9. Dunin-Barkovskij I.V., Kartashova A.N. Izmerenie i analiz sherohovatosti, volnistosti i nekruglosti poverhnosti [Measurement and analysis of surface roughness, waviness, and non-roundness]. M.: Mashinostroenie; 1978.
10. Thomas T.R. Rough surfaces. London: Imperial College Press, 1999. 278 p.

11. Musalimov V.M., Valetov V.A. Dinamika frikcionnogo vzaimodejstviya [Friction interaction dynamics]. SPb.: SpbGU ITMO; 2006.
12. Ogar P.M. Gorokhov D.B. Influence of Materials Hardenability Parameters on the Machine Parts Characteristics after Unloading. Key Engineering Materials. 2016. V. 723. pp. 369-375.
13. Ogar P.M. Gorokhov D.B. Meyer law application for solving problems of surface plastic deformation by spherical indentation. Applied Mechanics and Materials. 2015. V. 788. pp. 199-204.
14. Остапчук А.К., Овсянников В.Е. Применение теории фракталов в математическом моделировании и технике : Учебное пособие. Курган, издательство КГУ. 2009. 64 с.
15. Ostapchuk A.K., Ovsyannikov V.E. Primenenie teorii fraktalov v matematicheskom modelirovanii i tekhnike [Application of fractal theory in mathematical modeling and technology] : Uchebnoe posobie. Kurgan, izdatel's

© 2023 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

*The authors declare no conflict of interest.*

*About the authors:*

Viktor E. Ovsyannikov, Dr. Sc. in Engineering, Professor of the Department of Engineering Technology, Tyumen Industrial University, (625000, Russia, Tyumen, st. Volodarskiy, 38), e-mail: vik9800@mail.ru

Roman Yu. Nekrasov, C. Sc. in Engineering, Head of the Department of Technology of Mechanical Engineering, Tyumen Industrial University, (625000, Russia, Tyumen, st. Volodarskiy, 38), e-mail: suncler@mail.ru

Ilya M. Kovensky, Dr. Sc. in Engineering, Professor of the Department of "MateReal Science," Tyumen Industrial University, (625000, Russia, Tyumen, st. Volodarskiy, 38), e-mail: kovenskijim@tyuiu.ru

*Contribution of the authors:*

Viktor E. Ovsyannikov – problem statement, organization and conduct of investigations.

Roman Yu. Nekrasov – literature review on the research topic, data collection and analysis, text writing.

Ilya M. Kovensky – scientific management, data analysis, conclusions.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

