

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-18-28>

Диагностика токарной обработки металлов резанием посредством анализа вибрационных параметров

Е.В. Артамонов¹, Д.В. Васильев¹, В.В. Воронин¹ ✉

¹ Тюменский индустриальный университет
ул. Володарского 38, г. Тюмень 625000, Российская Федерация

✉ e-mail: vladislavalbus@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Работа посвящена доказательству, что вибрация державки режущего инструмента несет в себе информацию о текущей силе резания и виде сходящей стружки, а спектральный анализ виброускорения позволит извлечь данную информацию в полном объеме, что имеет потенциал для проведения оперативной диагностики режима резания и позволит, путем динамического корректирования параметров, соблюдать условия наилучшей обрабатываемости. Информация о виде стружки позволяет оценить температуру резания, как определяющий фактор стружкообразования, которую весьма проблематично измерить напрямую с достаточной точностью.

Методы. В работе логически обосновывается научное предположение о возможности оперативной диагностики процесса токарной обработки с помощью анализа спектра виброускорения державки режущего инструмента. Для подтверждения состоятельности предположения проведен натурный эксперимент. Предположение об изменении спектра следует из анализа причин, влияющих на величину проекций силы резания, а именно, вертикальной составляющей. Величина этой проекции определяется давлением стружки на переднюю поверхность резца.

Результаты. Проведена серия экспериментов по регистрации изменений спектрального состава вибрации режущего инструмента. Было доказано, что вибрация действительно несет информацию об основных параметрах процесса резания, то есть при изменении вида стружки качественно меняется состав спектра виброускорения. Адекватность полученных временных сигналов вертикальной составляющей виброускорения подтверждается их точным сходством с зависимостями вертикальной составляющей силы резания, поскольку эти характеристики связаны как причина и следствие.

Заключение. Спектральный анализ вибрации может стать основой оперативной диагностики токарной обработки металлов и лечь в основу Адаптивной системы управления режимами резания в станках с числовым программным управлением.

Ключевые слова: вибрация; спектральный анализ; оперативная диагностика; токарная обработка.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Артамонов Е.В., Васильев Д.В., Воронин В.В. Диагностика токарной обработки металлов резанием посредством анализа вибрационных параметров // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 18-28. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-18-28>.

Поступила в редакцию 15.10.2020

Подписана в печать 06.11.2020

Опубликована 30.12.2020

© Артамонов Е.В., Васильев Д.В., Воронин В.В., 2020

Rapid Diagnostic Test of Metal Turning Using Vibration Parameters Analysis

Evgeny V. Artamonov¹, Dmitriy V. Vasil'yev¹, Vladislav V. Voronin¹ ✉

¹ Tyumen Industrial University
38 Volodarskogo str., Tyumen 625000, Russian Federation

✉ e-mail: vladislavalbus@gmail.com

Abstract

Purpose of research. The work is devoted to the proof that the vibration of the cutting tool holder carries information about the current cutting force and the type of coming off chips, and the spectral analysis of vibration acceleration will allow to extract this information in full.

Methods. The work logically substantiates a scientific assumption about the possibility of prompt diagnostics of the turning process by analyzing the vibration acceleration spectrum of the cutting tool holder. To confirm the consistency of the assumption, a full-scale experiment was carried out.

Results. A series of experiments was carried out to register changes in the spectral composition of the vibration of the cutting tool. It has been proven that vibration really carries information about the basic parameters of the cutting process.

Conclusion. Spectral analysis of vibration can become the basis for operational diagnostics of metal turning by cutting and form the basis of the Adaptive System for Controlling Cutting Conditions in numerically controlled machines.

Keywords: vibration; spectral analysis; operational diagnostics; turning

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Artamonov E.V., Vasil'yev D. V., Voronin V. V. Rapid Diagnostic Test of Metal Turning Using Vibration Parameters Analysis. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 18-28 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-18-28>.

Received 15.10.2020

Accepted 06.11.2020

Published 30.12.2020

Введение

Обработка металлов резанием - многогранный процесс, который требует набора знаний из обширного списка технических наук, и вибродиагностика является одним из них. На практике вибрация является неотъемлемой частью механической обработки и полностью исключить ее невозможно, поскольку каждый узел станка и операция

технологического процесса вносят свой вклад в общий вибрационный фон.

Негативное влияние колебаний известно: быстрый износ инструмента, снижение качества поверхности, увеличение энергопотребления. Однако можно использовать вибрацию и как диагностический параметр, поскольку анализ вибрации может дать информацию о процессах, вызвавших ее.

С одной стороны, очевидно, вибрация – вредный фактор, разрушающее действие которого отрицательно сказывается на ресурсе режущего инструмента (РИ), механике и электронике станка, ухудшает условия труда цехового персонала, оказывая негативное влияние на здоровье человека. Контроль уровня вибрации производится на всех этапах ответственных и особо ответственных операций и технических процессов на производстве.

С другой стороны, вибрация – информативный параметр. От нее нельзя избавиться, но можно использовать как источник диагностических данных. Цель данного исследования – доказать, что вибрация державки режущего инструмента несет в себе информацию о текущей силе резания и виде сходящей стружки, а спектральный анализ виброускорения позволит извлечь данную информацию в полном объеме. Информация о виде стружки позволяет узнать

температуру резания, как определяющий фактор стружкообразования, которую весьма проблематично измерить напрямую с достаточной точностью [1-18].

Материалы и методы

Значительная польза от такого рода диагностики ожидается при механической обработке металлов. В частности, при обработке жаропрочных сплавов имеет место диапазон, в котором наблюдается минимальная величина износа и максимальная стойкость инструмента – максимальное значение коэффициента обрабатываемости. При входе режима обработки в этот диапазон происходит изменение вида стружки со сливной в элементную, что изменяет тип и величину нагрузки на РИ, следовательно, изменятся и состав спектра возбуждаемой вибрации. На рис. 1 приведена классификация стружки по И.А. Тиме. Выделены следующие виды: сливная, суставчатая, элементная, надлома.

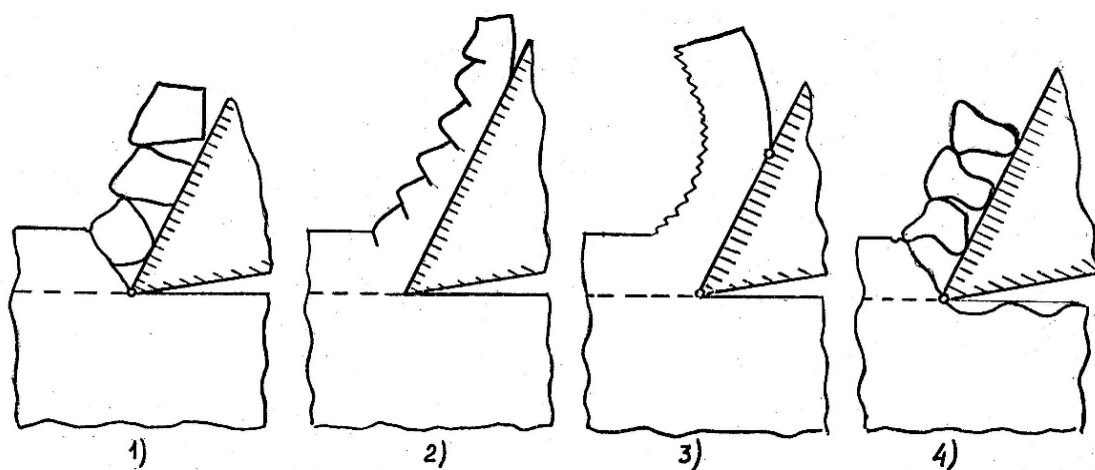


Рис. 1. Классификация видов стружки (И.А. Тиме): 1 – элементная; 2 – суставчатая; 3 – сливная; 4 – надлома

Fig. 1. Classification of shavings types (I.A.Time): 1 – elemental; 2 – articular; 3 – drain; 4 – breakage

Сливная стружка непрерывна, элементная состоит из отдельных «элементов» схожей формы и размера, несвязанных между собой. Границу, отделяющую образовавшийся элемент от срезаемого слоя, называют поверхностью сдвига. Суставчатая стружка является промежуточным звеном, плоскость сдвига между элементами только намечалась, она хорошо различима, но не пронизывает стружку по всей толщине.

Для каждого вида стружки характерна различная площадь контакта с передней поверхностью резца, причем для элементной и суставчатой прослеживается периодичность в воздействии на резец, в то время как сливная стружка предполагает стабильное, безотрывное нагружение. Ожидается, что переход из сливной, безотрывно скользящей по передней поверхности резца, стружки в суставчатую, состоящую из слабо связанных между собой частиц, сопровождается изменением спектрального состава колебаний режущего инструмента. Предположение об изменении спектра следует из анализа причин, влияющих на величину проекций силы резания, а именно, вертикальной составляющей P_z . Величина этой проекции определяется давлением стружки на переднюю поверхность резца.

Отслеживание этих изменений имеет потенциал для проведения оперативной диагностики режима резания и позволит, путем динамического коррек-

тирования параметров, соблюдать условия наилучшей обрабатываемости.

Экспериментальное исследование заключается в сборе данных о виде сходящей стружки, записи сигналов составляющей силы резания P_z и вертикальной составляющей виброускорения a_z в процессе резания (рис. 2). Эксперимент повторяется до тех пор, пока не будут получены параметры режима для ярко выраженных сливной и суставчатой стружек.

Затем, синтез полученной информации дает спектры виброускорения и силы резания в ожидаемом диапазоне частот образования сегментов суставчатой стружки.

Частота образования сегментов суставчатой стружки f определяется размером элемента Δx и скоростью резания V :

$$f = \frac{V}{\Delta x}, \quad (1)$$

где f – расчетная частота образования элементов [Гц]; V – скорость резания, [м/с]; Δx – расстояние между гребешками (или впадинами) суставчатой стружки [7].

$$V = \pi \cdot D \cdot n, \quad (2)$$

где D – диаметр заготовки, [м]; n – число оборотов в секунду, [Гц].

Результаты и их обсуждение

Измерение Δx проводилось по фотографиям с цифрового микроскопа. Величина Δx принята равной среднему арифметическому по 10 измерениям (рис. 3).

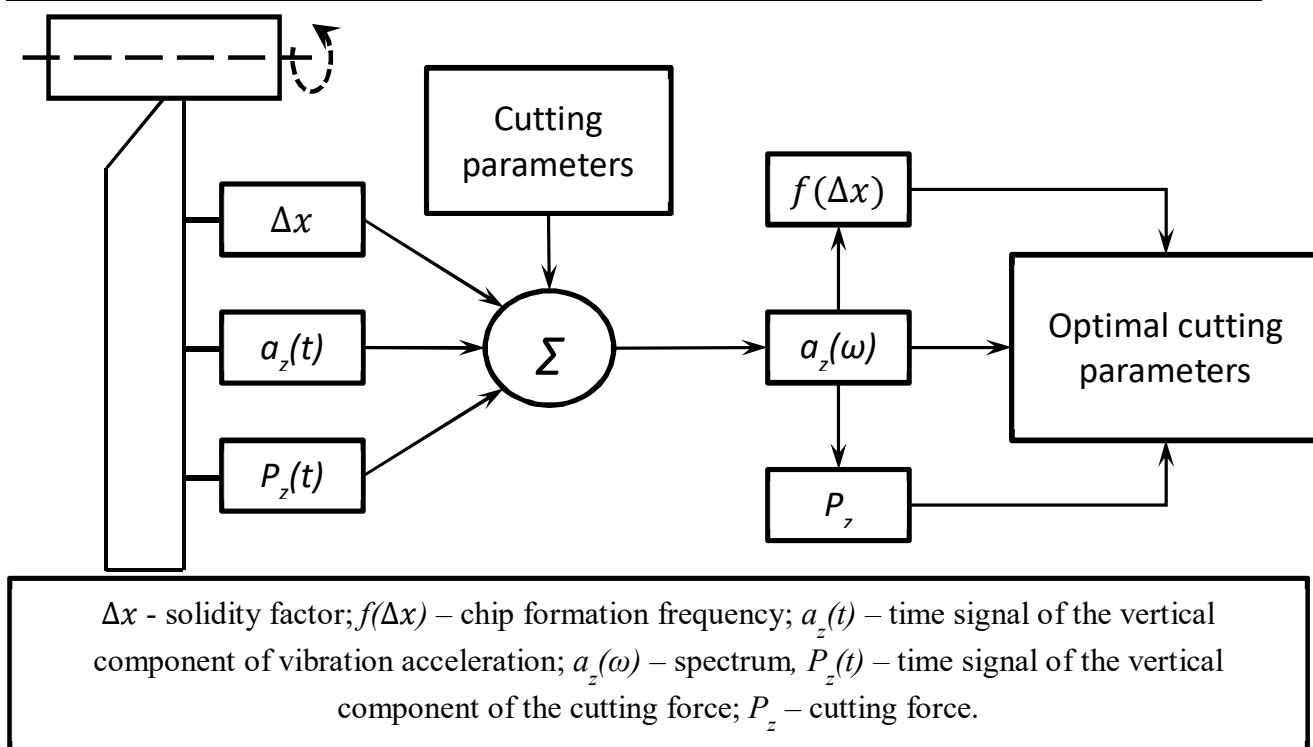


Рис. 2. Методика проведения эксперимента

Fig. 2. Technique of the experiment

Изменения в спектре необходимо искать в окрестностях расчетной частоты стружкообразования (сегментообразования) f , для этого посредством цифровой

обработки данных, а именно полосового КИХ фильтра, выделим область $f_{low} > f > f_{high}$ и сравним спектры, относящиеся к сливной и суставчатой стружкам.

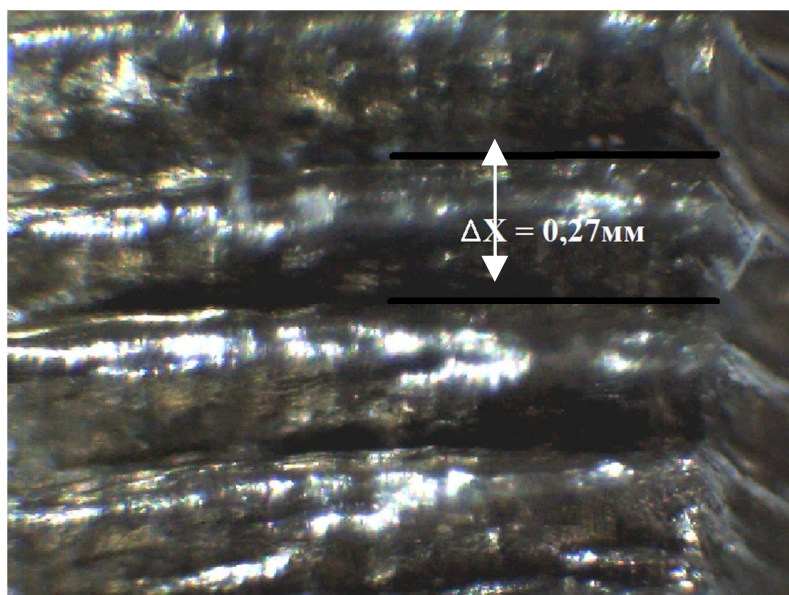


Рис. 3. Фото суставчатой стружки. Сталь 1X18H9T. Режущий инструмент T15K6. $S = 0.39$ мм/об., $t = 1$ мм, $D = 54$ мм

Fig. 3. Articular shavings. Steel 1X18H9T. Cutting tool T15K6. $S = 0.39$ мм/об., $t = 1$ мм, $D = 54$ мм

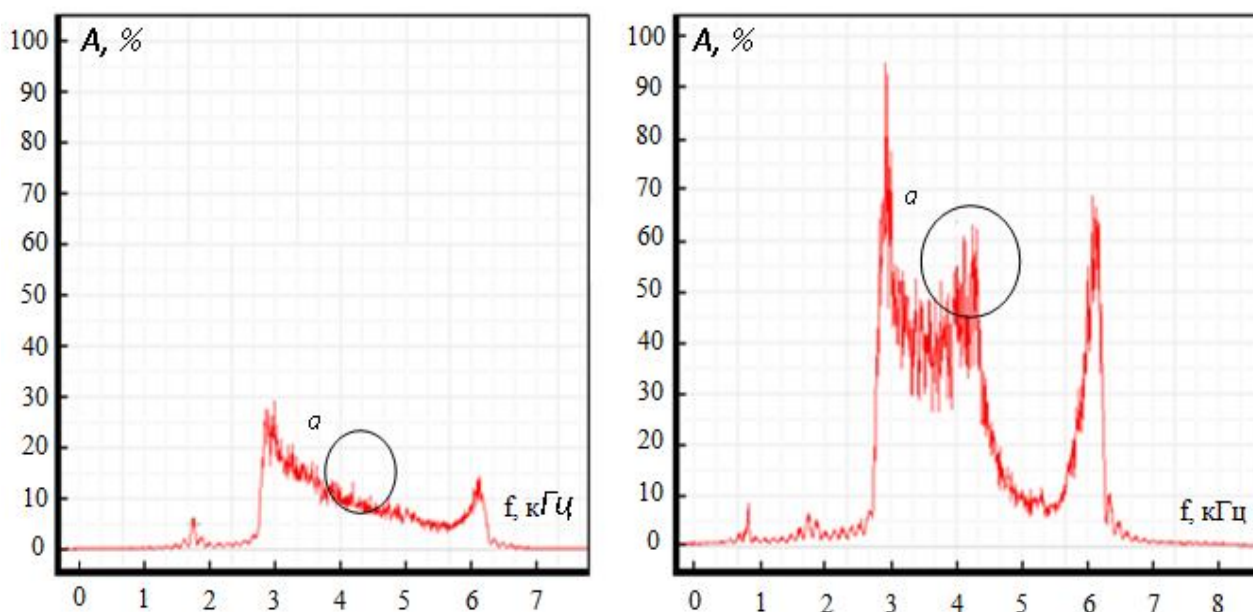


Рис. 4. Сравнение спектров

Fig. 4. Comparison of spectra

На рис. 4 приведены два спектра вертикальной составляющей виброускорения державки режущего инструмента. Левый соответствует точению со сходящей сливной стружкой: $n = 100$ об/мин; $S = 0,39$ мм/об.; $t = 1$ мм; $D = 54$ мм; правый спектр – с суставчатой стружкой: $n = 400$ об/мин; $S = 0,39$ мм/об.; $t = 1$ мм, $D = 54$ мм. Отчетливо видно наличие пика в области a на спектре справа на ожидаемой частоте стружкообразования f , в то время как на левом спектре пики отсутствуют. Расчет средней частоты сегментообразования приведен ниже:

$$f = \frac{\pi D n}{\Delta x} = \frac{\pi * 54 * 400}{0,27 * 60} = 4189 \text{ Гц.} \quad (3)$$

Выражение (3) определяет среднюю частоту сегментообразования, поскольку в расчет берется средняя величина Δx . В реальном спектре наблюдается группа пиков, соответствующих ряду

наиболее часто встречающихся значений Δx . Девиация частоты оценивается предельным значением в 300 Гц в момент изменения вида стружки, далее величина отклонения уменьшается. Однако данное наблюдение требует дальнейшей проверки, поскольку необходима более обширная база экспериментальных данных.

Таким образом, вибрация державки резца определенно несет в себе информацию о виде стружки, образующейся в момент наблюдения.

Чтобы подтвердить адекватность снятого вибросигнала необходимо сравнить его с силой резания, поскольку именно она является вынуждающей силой исследуемых осцилляций.

На рис. 5 представлены спектр вертикальной составляющей силы резания P_z и спектр вертикальной составляющей виброускорения a_z .

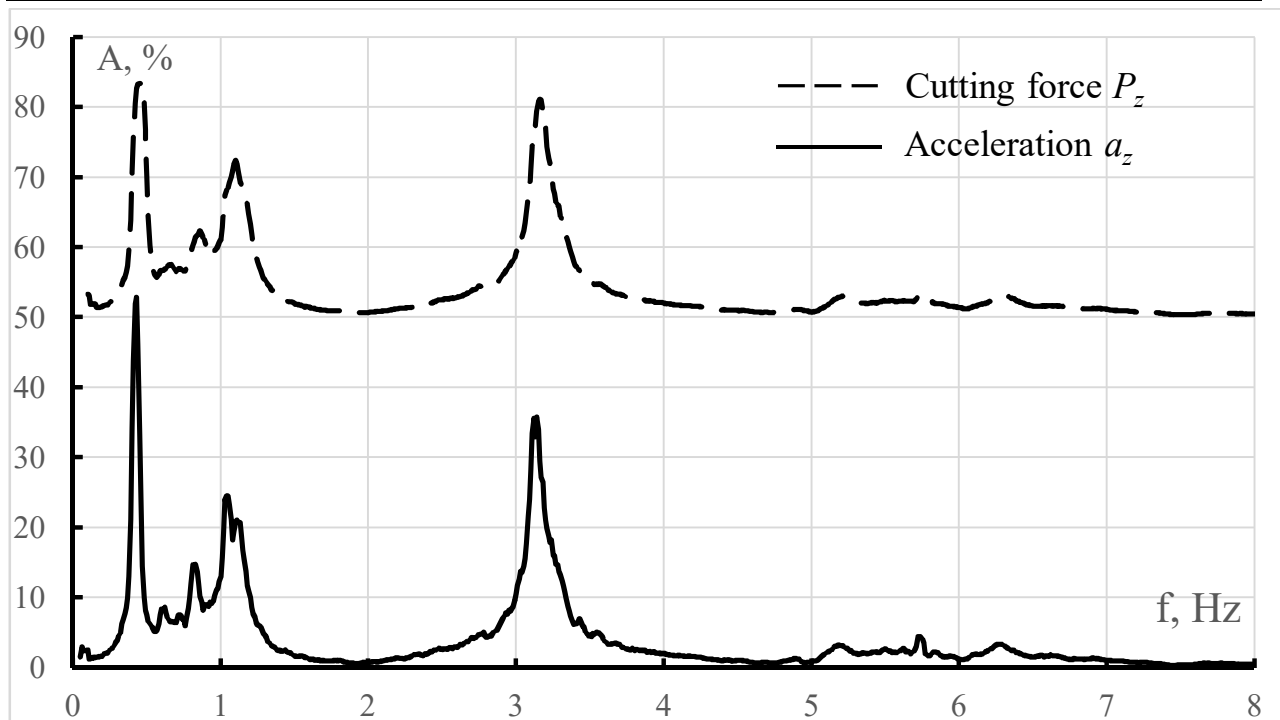


Рис. 5. Сравнение спектров виброускорения и составляющей силы резания P_z

Fig. 5. Comparison of the spectra vibration acceleration and the cutting force component P_z

Они качественно повторяют друг друга на всех наблюдаемых частотах, поскольку связаны как причина и следствие.

Выводы

Таким образом, было доказано, что вибрация действительно несет информа-

цию об основных параметрах процесса резания. Следовательно, спектральный анализ вибрации может стать основой оперативной диагностики токарной обработки металлов резанием и лечь в основу Адаптивной системы управления режимами резания в станках с числовым программным управлением.

Список литературы

1. Артамонов Е.В., Васильев Д.В., Утешев М.Х. Формирование условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов путем высокотемпературного охрупчивания при резании // СТИН. 2016. № 9. С. 21-24.
2. Бражкин Ю.А. Виброконтроль станочного оборудования и технологических процессов обработки металлов // Известия МГТУ. 2007. №2 (4).
3. Васин Л. А., Васин С. А., Кошелева А. А. Эмерджентный подход к созданию виброустойчивых режущих инструментов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. №11-2.

4. Васин С. А. Прогнозирование виброустойчивости инструмента при точении и фрезеровании. Серия «Библиотека инструментальщика». М.: Машиностроение, 2006. 384 с.
5. Взаимосвязь явлений при резании металлов и температурный фактор / Е. В. Артамонов [и др.]. Тюмень : ТюмГНГУ, 2014. 152 с.
6. Вибродиагностика : моногр. / Г. Ш. Розенберг, Е. З. Мадорский [и др.]; под ред. Г.Ш. Розенберга. СПб.: ПЭИПК, 2003. 284 с.
7. Динамический виброгаситель с системой автоматической настройки на частоту колебаний / А. Н. Гаврилин, П. С. Рожков, О. О. Ангаткина, Б. Б. Мойзес // Известия ТПУ. 2011. №2.
8. Голосной С. В., Чукарин А. Н. Экспериментальные исследования спектров шума и вибрации копировально-фрезерных станков // Вестник ДГТУ. 2016. №4 (87).
9. Григорьев С. Н., Козочкин М. П., Сабиров Ф. С. Диагностика автоматизированного производства. М.: Машиностроение, 2011. 600 с.
10. Завгородский В.И., Маслов А.Р. Управление виброустойчивостью технологической системы // Комплект: ИТО. 2009. № 10. С. 22–25.
11. Ивович В.А., Онищенко В.Я. Защита от вибраций в машиностроении. М.: Машиностроение, 1990. 272 с.
12. Системы виброзащиты, виброконтроля и вибродиагностики промышленного оборудования / Е. Н. Ишметьев, Д. В. Чистяков, А. Н. Панов, Е. Э. Бодров, М. Вrabел // ЭС и К. 2019. №1 (42).
13. Козочкин М. П., Сабиров Ф. С., Маслов А. Р. Станки с ЧПУ с системами диагностики // Комплект: ИТО. 2010. № 6. С. 34–35.
14. Козочкин М. П. Особенности вибраций при резании материалов // СТИН. 2009. № 1. С. 29–35.
15. Козочкин М.П., Сабиров Ф.С. Оперативная диагностика при металлообработке – проблемы и задачи // Вестник МГТУ «Станкин». 2008. №3.
16. Литвинчук А.Ю. Анализ спектра вибрации режущего инструмента // Решетневские чтения. 2011. №15.
17. Матюшкова О. Ю., Тэттэр В. Ю. Современные методы виброакустического диагностирования // Омский научный вестник. 2013. №3 (123).
18. Метод формирования условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов путем высокотемпературного охрупчивания при резании / Е. В. Артамонов [и др.]. Тюмень : ТИУ, 2016. 181 с.
19. Несмеянов Е. А. Демпфирование колебаний несущей системы многошпиндельных фрезерных станков // Вестник ВГТУ. 2010. №3.

20. Хоменко А. П., Елисеев С. В., Засядко А. А. Формирование концепции вибродиагностических методов неразрушающего контроля. Современные представления // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2008. №1.

References

1. Artamonov E.V., Vasil'yev D.V., Uteshev M.Kh. Formirovanie uslovii maksimal'noi obrabatyvaemosti zharoprochnykh materialov putem vysokotemperaturnogo okhrupchivaniya pri rezanii [Formation of conditions for maximum machinability of heat-resistant materials by high-temperature embrittlement during cutting]. *STIN*, 2016, no. 9, pp. 21-24 (In Russ.).

2. Brazhkin Yu.A. Vibrokontrol' stanochnogo oborudovaniya i tekhnologicheskikh protsessov obrabotki metallov [Vibration control of machine tools and technological processes of metal processing]. *Izvestiya MGTU = Proceedings of the MSTU*, 2007, no. 2 (4) (In Russ.).

3. Vasin L.A., Vasin S.A., Kosheleva A.A. Emerdzhentnyi podkhod k sozdaniyu vibroustoichivyykh rezhushchikh instrumentov [Emergent approach to creation of vibration-resistant cutting tools]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of the TSU. Technical Science*, 2014, no.11-2 (In Russ.).

4. Vasin S.A. *Prognozirovanie vibroustoichivosti instrumenta pri tochenii i frezerovanii. Seriya "Biblioteka instrumental'shchika"* [Prediction of tool vibration resistance at turning and milling. Set "Library of Tool Maker"]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 384 p. (In Russ.).

5. Artamonov E. V. [and others]. *Vzaimosvyaz' yavlenii pri rezanii metallov i temperaturnyi faktor* [The relationship of phenomena when cutting metals and the temperature factor]. Tyumen, 2014. 152 p. (In Russ.).

6. Rosenberg G. Sh., Madorsky E. Z. [and others]. *Vibrodiagnostika* [Vibration diagnostics]. St. Petersburg, PEIPK Publ., 2003. 284 p. (In Russ.).

7. Gavrilin A. N., Rozhkov P. S., Angatkina O. O., Moyzes B. B. Dinamicheskii vibrogasitel' s sistemoi avtomaticheskoi nastroyki na chastotu kolebaniy [Dynamic vibration damper with a system of automatic tuning to the vibration frequency]. *Izvestiya TPU = Proceedings of the TSU*, 2011, no.2 (In Russ.).

8. Golosnoy, S.V., Chukarin, A.N. Eksperimental'nye issledovaniya spektrov shuma i vibratsii kopiroval'no-frezernykh stankov [Experimental studies on noise and vibration spectra of copy milling machines]. *Vestnik DGTU = Vestnik DonSTU*, 2016, no.4 (87) (In Russ.).

9. Grigoriev S. N., Kozochkin M. P., Sabirov F. S. *Diagnostika avtomatizirovannogo proizvodstva* [Diagnostics of automated production]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2011. 600 p. (In Russ.).

10. Zavgorodsky V.I., Maslov A.R. Upravlenie vibroustoichivost'yu tekhnologicheskoi sistemy [Vibration resistance control of the technological system]. *Komplekt: ITO = Complete Set: ITO*, 2009, no. 10, pp. 22-25 (In Russ.).
11. Iovovich V. A., Onishchenko V. Ya. Zashchita ot vibratsii v mashinostroenii [Vibration protection in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 272 p. (In Russ.).
12. Ishmetiev E.N., Chistyakov D.V., Panov A.N., Bodrov E.E., Vrabel M. Sistemy vibrozashchity, vibrokontrolya i vibrodiagnostiki promyshlennogo oborudovaniya [Vibration protection, control and analysis systems for industrial application]. *Elektricheskie sistemy i komplekсы = Electrical Systems and Complexes*, 2019, no.1 (42) (In Russ.).
13. Kozochkin M. P., Sabirov F. S., Maslov A. R. Stanki s ChPU s sistemami diagnostiki [CNC machines with diagnostic systems]. *Komplekt: ITO = Complete Set: ITO*, 2010, no. 6, pp. 34–35 (In Russ.).
14. Kozochkin M.P. Osobennosti vibratsii pri rezanii materialov [Features vibrations when cutting materials]. *STIN*, 2009, no. 1, pp. 29-35 (In Russ.).
15. Kozochkin M.P., Sabirov, F.S. Operativnaya diagnostika pri metalloobrabotke – problemy i zadachi [operational diagnostics in metalworking - problems and tasks]. *Vestnik MGTU «Stankin» = Vestnik MSTU “Stankin”*, 2008, no. 3 (In Russ.).
16. Litvinchuk A. Yu. Analiz spektra vibratsii rezhushchego instrumenta [Analysis of vibration spectrum of cutting tool]. *Reshetnevskie chteniya = Reshetnev Readings*, 2011, no. 15 (In Russ.).
17. Matyushkova O.Yu., Tetter V.Yu. Sovremennyye metody vibroakusticheskogo diagnostirovaniya [Modern methods of vibroacoustic diagnostics]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2013, no. 3 (123) (In Russ.).
18. Artamonov E.A. [and others]. *Metod formirovaniya uslovii maksimal'noi obrabatyvaemosti zharoprochnykh materialov putem vysokotemperaturnogo okhrupchivaniya pri rezanii* [Method of conditions forming for maximum workability of heat-resistant materials by high-temperature embrittlement during cutting]. Tyumen, 2016. 181 p. (In Russ.).
19. Nesmeyanov E.A. Dempfirovanie kolebanii nesushchei sistemy mnogoshpindel'nykh frezernykh stankov [Damping fluctuations of bearing system many spindle of milling machine tools]. *Vestnik VGTU = Vestnik VSTU*, 2010, no.3 (In Russ.).
20. Khomenko A. P., Eliseev S. V., Zasyadko A. A. Formirovanie kontseptsii vibrodiagnosticheskikh metodov nerazrushayushchego kontrolya. Sovremennyye predstavleniya [Formation of the concept of vibrodiagnostic methods of non-destructive testing]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie = Modern Concepts. Modern technologies, System analysis, Modeling*, 2008, no. 1 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Артамонов Евгений Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Станки и инструменты»,
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный
университет», г. Тюмень, Российская Федерация,
e-mail: artamonovev@tyuiu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3099-4435>

Evgeny V. Artamonov, Dr. of Sci.
(Engineering), Professor, Head of the Machines
and Tools Department, Industrial University
of Tyumen, Tyumen, Russian Federation,
e-mail: artamonovev@tyuiu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3099-4435>

Васильев Дмитрий Вячеславович,
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Станки и инструменты»,
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный
университет», г. Тюмень, Российская Федерация,
e-mail: vasil'evdv@tyuiu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7436-091X>

Dmitriy V. Vasil'yev, Cand. of Sci.
(Engineering), Associate Professor, Machines
and Tools Department, Industrial University
of Tyumen, Tyumen, Russian Federation,
e-mail: vasil'evdv@tyuiu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7436-091X>

Воронин Владислав Вадимович, аспирант,
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный
университет», г. Тюмень, Российская Федерация,
e-mail: vladislavalbus@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8398-740X>

Vladislav V. Voronin, Post-Graduate Student,
Industrial University of Tyumen,
Tyumen, Russian Federation,
e-mail: vladislavalbus@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8398-740X>