

УДК 621.941.08

DOI: 10.25206/1813-8225-2021-180-5-10

**Е. В. АРТАМОНОВ**  
**В. В. ВОРОНИН**  
**Т. Е. ПОМИГАЛОВА**

Тюменский  
индустриальный университет,  
г. Тюмень

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ГЛАВНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Установлен способ локализации полос спектра главной составляющей силы резания во времени при токарной обработке металлов. В основу методики определения источника спектральных составляющих положено оконное преобразование Фурье. Измерение силы резания проводилось с помощью динамометра серии УДМ, оснащенного разработанным авторами электрическим преобразователем. Сопоставлены средние мощности спектральных составляющих сигналов колебаний вертикальной проекции силы при разных скоростях резания в особо чувствительных диапазонах частот, определенных авторами посредством анализа спектрограмм.

**Ключевые слова:** вибрация, резание металлов, токарная обработка, преобразование Фурье, сила резания.

**Введение.** Процесс обработки металлов резанием неизбежно сопровождается вибрацией, избавиться от которой невозможно. Флуктуации технологической системы станка и режущего инструмента мешают получить высокую точность геометрии изделия и требуемую шероховатость поверхности, снижают стойкость инструмента и повышают интенсивность износа всей системы. Исследование факторов, вызывающих вибрацию, и параметров станочной системы, определяющих ее параметры, является необходимой задачей для обеспечения условий максимальной производительности и высокого качества изделий. Исследование параметров вибрации и автоколебаний технологической системы станка при резании [1–5] актуально и ведется на базе крупнейших отечественных технологических университетов. В работах [6, 7] было установлено, что вибрация несет оперативную диагностическую информацию о процессе резания, износе режу-

щего инструмента. На основе анализа вибрационных характеристик в работах [8–10] показана возможность построения адаптивных систем для контроля оптимальной скорости резания и периода своевременной замены режущего инструмента. В настоящее время наиболее актуальной темой является интеллектуализация производства, то есть обеспечение промышленного оборудования специальными системами, которые помогают добиться наиболее рациональных условий технологического процесса.

В работах [11–13] показано, что температурный фактор процесса резания является решающим для условий максимальной обрабатываемости, поскольку определяет взаимосвязь физико-механических свойств системы режущий инструмент — обрабатываемый материал.

Исследование зависимости физико-механических факторов процесса резания от температуры может быть проведено в связи с уровнем вибра-

ции технологической системы станка, а именно колебаний режущего инструмента в зоне резания. Поскольку уровень вибрации отражает износ по задней поверхности, силовое воздействие на режущий инструмент, имеет смысл искать также корреляцию механических свойств режущего инструмента из твердого сплава и температуры резания (скорости резания) с уровнем вибрации при обработке жаропрочных сплавов. Современный уровень развития станков с ЧПУ [14] позволит исследовать и использовать данные параметры для оптимизации процесса резания.

Цель эксперимента: найти экспериментальный метод сопоставления полос спектра вибрации с вызывающими их процессами посредством анализа главной составляющей силы резания  $P_z$  в широком частотном диапазоне с возможностью локализации спектральных составляющих, как по частоте, так и по времени, для возможного использования при оптимизации режимов резания в автоматическом режиме.

Задачи:

1. Тарировать динамометр.
2. Снять временной сигнал главной составляющей силы резания.
3. Проанализировать спектрограммы выбранных скоростей резания.
4. Указать наиболее чувствительные к изменению скорости резания диапазоны частот на спектрах.
5. Сопоставить мощности сигнала в зависимости от скорости резания в особо чувствительных диапазонах частот спектра.

**Материалы и методы.** Сила резания возникает в результате сопротивления срезаемого слоя деформации сжатия, трения стружки о режущий инструмент и некоторых других факторов. Проекция силы резания на оси координат  $P_z$ ,  $P_x$ ,  $P_y$  являются технологическими составляющими силы резания при токарной обработке. Сила  $P_z$  называется главной составляющей силы резания, она является наибольшей по величине и создает крутящий момент на шпинделе, следовательно, нагружает главный привод. В качестве диагностического параметра в данном случае может использоваться именно составляющая  $P_z$  силы резания, поскольку она несет информацию о характере нагрузки на резец и, косвенно, о механических свойствах обрабатываемого материала. Данные о силе резания были получены при продольном наружном точении. Применялся проходной резец с механическим креплением сменных многогранных пластин. Пластина четырехгранная с длиной стороны 16 мм, твердый сплав Т15К6. В качестве обрабатываемого материала была выбрана одна из наиболее распространенных коррозионностойких, жаростойких и жаропрочных сталей аустенитного класса 1Х18Н9Т. Применяется для изготовления деталей машин, трубопроводов, лопаток и других изделий энергетического машиностроения, работающего при температуре до 600 °С. Обработка резанием проводилась с одной установки заготовки, глубина резания ( $t = 1$  мм) и подача ( $S = 0,39$  мм/об) были выбраны заранее и не изменялись во время проведения эксперимента. Изменение скорости резания обеспечивалось

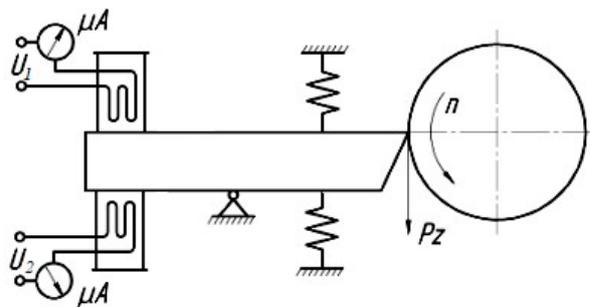


Рис. 1. Схема электрического динамометра с тензодатчиками

подбором соответствующей оборотной частоты заготовки (1).

$$V = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000}, \quad (1)$$

где  $V$  — скорость резания, м/мин;  $d$  — диаметр заготовки, мм;  $n$  — число оборотов, об/мин.

Сбор данных о силе резания проводился с помощью электрического динамометра серии УДМ600, построенного на основе тензорезистивных полумостов, функциональная схема показана на рис. 1. Измерение величины силы резания в динамометре такого типа производится по пропорциональным деформациям, возникающим в упругих элементах и преобразовании величины механической деформации упругого элемента в сопротивление, а затем в напряжение. Необходимой частью динамометра является усилитель-нормализатор или измерительный преобразователь, согласующий и усиливающий слабый первичный сигнал разбалансировки тензорезистивного моста с системой измерения и оцифровки, то есть данный измерительный канал преобразует деформацию упругого элемента в отформатированный сигнал, подаваемый на регистрирующее устройство. Преобразователь первичного сигнала для согласования динамометра с системой сбора данных был разработан и изготовлен авторами специально для данного эксперимента. Тарировка измерительного канала проводилась непосредственно перед началом эксперимента с помощью нагрузочного устройства и эталонного механического динамометра. Полученная в результате тарировки зависимость выходного напряжения измерительного канала от приложенной силы представлена на рис. 2.

$$U = 0,0022P_z + 0,0015, \quad (2)$$

где  $U$  — выходное напряжение измерительного канала, В;  $P_z$  — вертикальная составляющая силы резания, Н.

Зависимость выходного напряжения от силы (2) при нагружении и разгрузении выражается линейным уравнением, точки практически совпадают, гистерезис не наблюдается, в связи с этим уравнение (2) будет применено для описания и процесса нагружения и разгрузения. Коэффициент детерминации близок к единице при

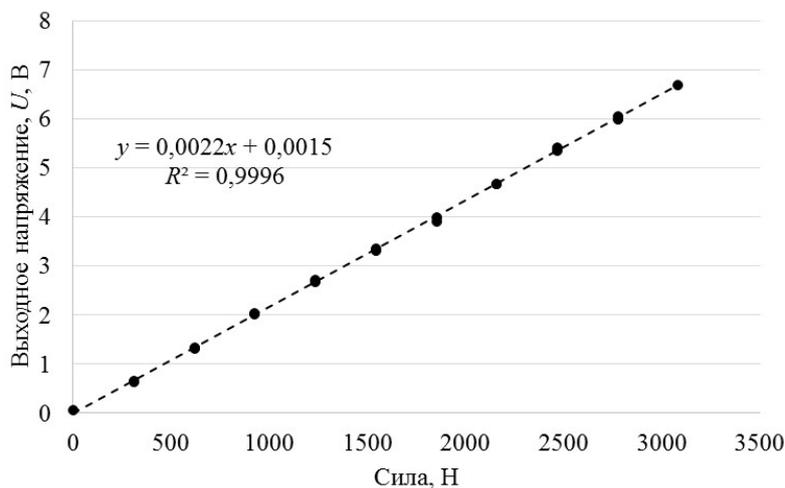


Рис. 2. Зависимость выходного напряжения от силы при нагружении и разгрузении

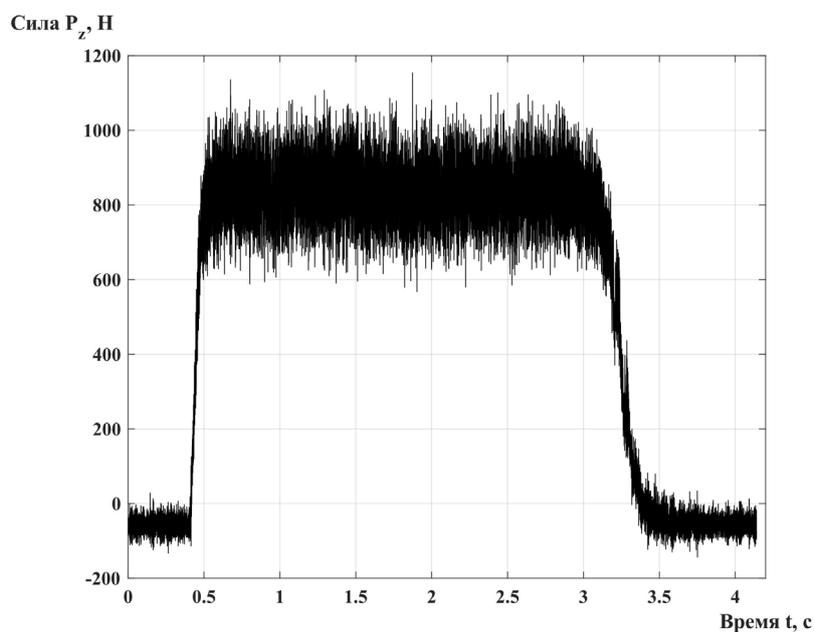


Рис. 3. Временной сигнал  $P_z$  в процессе резания

линейной интерполяции (рис. 2), следовательно, малы нелинейные искажения, вносимые усилителем, дрейф нуля при непрерывной работе продолжительностью несколько часов составил не более 50 мВ, дрейф нуля при продолжительно статической нагрузке отсутствует.

Необходимо помнить, что при тарировке на резец своим весом действует нагрузочное устройство, которое в полностью отпущенном состоянии все равно воздействует на резец своей массой, следовательно, свободный член  $b$  передаточной функции (2) необходимо вычитать для получения адекватных данных. Данное утверждение верно только при точной настройке усилителя измерительного канала, поскольку он также может вносить существенное смещение.

**Результаты и их обсуждение.** На рис. 3 показана зависимость главной составляющей силы резания  $P_z$  от времени  $t$ .

В начальный момент времени наблюдается собственный шум станка с включенным главным приводом величиной  $\pm 50$  Н относительно смещенного вниз на 50 Н сигнала.

Далее включается автоматическая продольная подача станка и спустя 0,4 с резец приходит в контакт с заготовкой, составляющая  $P_z$  скачкообразно растет до 750 Н и в момент времени  $t_1 = 0,5$  с процесс резания (стружкообразования) стабилизируется. В промежуток времени 3,2... 3,5 с происходит выход резца из заготовки, после чего сигнал возвращается к первоначальному состоянию.

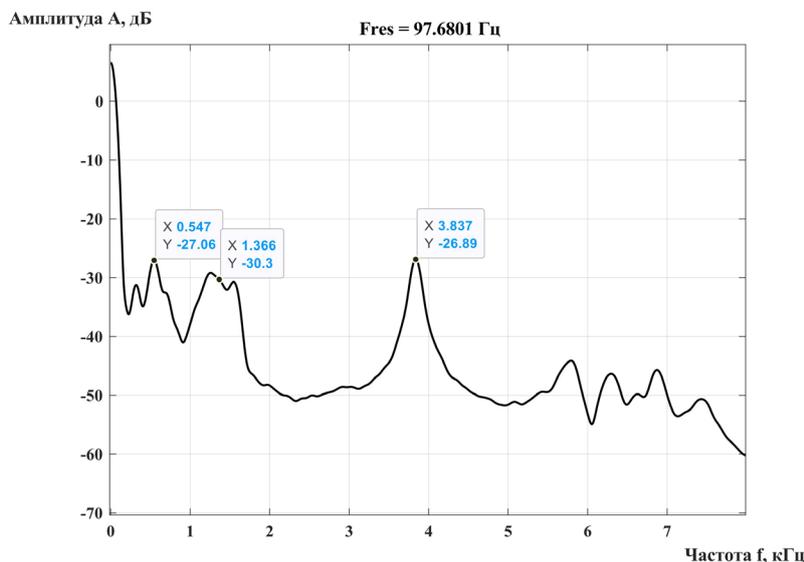


Рис. 4. Спектр главной составляющей силы резания

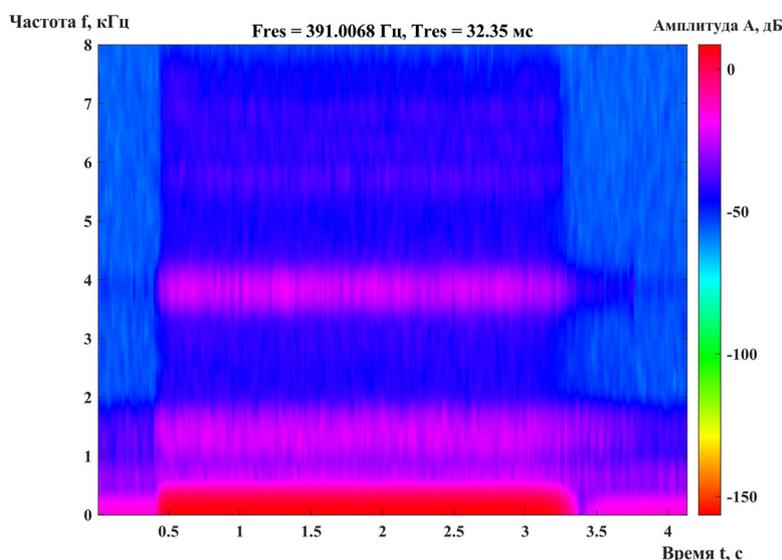


Рис. 5. Спектрограмма вертикальной составляющей силы резания

Описанную выше зависимость  $P_z(t)$  необходимо проанализировать в частотной области. Для этого авторами применено быстрое Фурье-преобразование, результат которого представлен на рис. 4. Явно прослеживаются области с высокой амплитудой окрестности частот  $f_1 = 0,5$  кГц,  $f_2 = 1,4$  кГц и  $f_3 = 3,8$  кГц. Разрешающая способность  $F_{res}$  в данном случае составила 97,68 Гц. Однако по спектру невозможно локализовать гармоники во временной области. Интерес в данном случае представляет принадлежность гармоник к определенным временным интервалам сигнала  $P_z(t)$ . Для более глубокого анализа следует рассматривать сигнал в частотно-временном представлении, которое способно показать Вейвлет-анализ или оконное преобразование Фурье. Первый аппарат чаще применяется для фильтрации и свертки, причем не только одномерных сигналов, но и изображений и трехмерных структур. Оконное преобразова-

ние Фурье является более простым с точки зрения вычислений и интерпретации результатов, представляет собой быстрое преобразование Фурье с введением скользящей во временной области оконной функции. Спектрограмма сигнала  $P_z(t)$  представлена на рис. 5. По осям отложены частота  $f$  и время  $t$ , цветом обозначена амплитуда  $A$  первичного сигнала по напряжению, не переведенного по уравнению (2) в единицы силы. Шкала амплитуды имеет логарифмический масштаб и измеряется в децибелах.

Частоты в окрестностях  $f_1$  и  $f_2$  обнаруживаются в сигнале с момента времени  $t_0 = 0$  с и значительно усиливаются с момента времени  $t_2 = 0,4$  с, соответствующего моменту касания режущим инструментом заготовки. Частоты в окрестности  $f_3$  отсутствуют в спектре вплоть до  $t_2$ .

На основании вышеизложенных наблюдений можно предположить, что  $f_1$  и  $f_2$  характеризуют

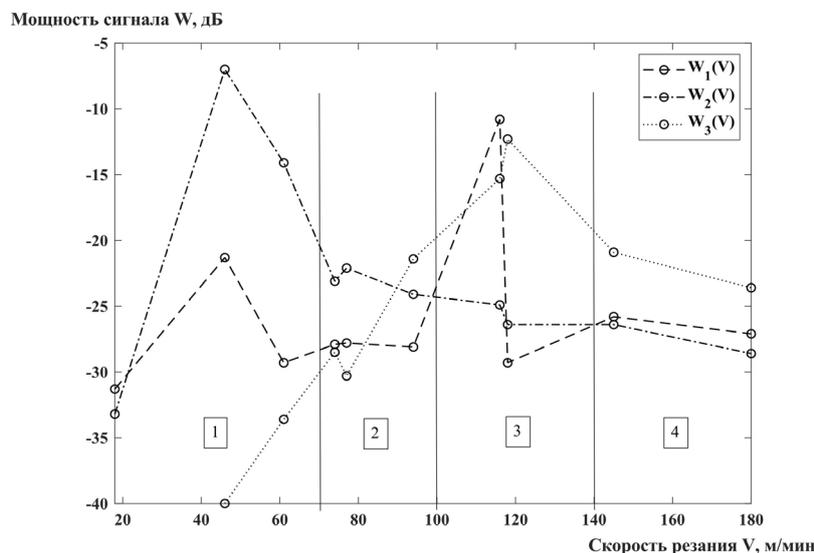


Рис. 6. Зависимость мощности колебаний от скорости резания в трех диапазонах частот

Таблица 1

Перечень скоростей резания

| Ед. изм. | $V_1$ | $V_2$ | $V_3$ | $V_4$ | $V_5$ | $V_6$ | $V_7$ | $V_8$ | $V_9$ | $V_{10}$ |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| м/мин.   | 18    | 46    | 61    | 74    | 77    | 94    | 116   | 118   | 145   | 180      |

собственный шум станка с включенным главным приводом, а  $f_3$  относится непосредственно к процессу стружкообразования.

Проследим изменения максимальных амплитуд полос спектра в окрестностях частот  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3$  при разных скоростях резания  $V$ . На рис. 6 показаны изменения мощности колебаний от скорости резания в трех диапазонах частот  $W_1 = 400...600$  Гц,  $W_2 = 1200...1700$  Гц,  $W_3 = 3600...3900$  Гц. Для построения зависимостей было взято десять спектров  $P_z(t)$  при разных скоростях резания. Выбранные скорости резания приведены в табл. 1.

В областях 2 и 4 (рис. 6) отсутствуют значительные показатели мощности колебаний для всех трех исследуемых диапазонов.

Таким образом, диапазоны скоростей 75–100 м/мин и свыше 140 м/мин характеризуются наименьшей мощностью вибрации.

#### Заключение.

1. В результате тарировки получена передаточная функция измерительного канала динамометра.

2. Получены временные сигналы главной составляющей силы резания при токарной обработке сплава 1X18H9T, включающие моменты врезания, выхода резца и установившегося режима.

3. Проанализированы спектрограммы скоростей резания. Обнаружены диапазоны частот, соответствующие участкам установившегося ста-

ционарного процесса резания и полосы собственного шума технологической системы станка.

4. Установлены наиболее чувствительные к изменению скорости резания диапазоны частот на спектрах главной составляющей силы резания.

5. Выделена группа зависимостей мощностей сигнала в зависимости от скорости резания в особо чувствительных диапазонах частот, характеризующая предпочтительные и нежелательные скорости резания для исследуемого материала.

6. Экспериментально проверен метод локализации гармоник спектра во времени и способ определения принадлежности полос спектра процессу стружкообразования.

#### Благодарности

Авторы выражают благодарность кандидату технических наук, заведующему лабораторией кафедры «Станки и инструменты» Васильеву Д. В. и старшему преподавателю кафедры «Станки и инструменты» Золотухину И. С. за помощь в проведении экспериментов.

#### Библиографический список

1. Григорьев С. Н., Козочкин М. П., Сабиров Ф. С. Диагностика автоматизированного производства. Москва: Машиностроение, 2011. 600 с.

2. Козочкин М. П. Особенности вибраций при резании материалов // СТИН. 2009. № 1. С. 29–35.
3. Козочкин М. П., Сабиров Ф. С., Боган А. Н. [и др.]. Мониторинг состояния технологического оборудования на промышленных предприятиях // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 8 (61). С. 56–62.
4. Гаврюшин С. С., Досько С. И., Утенков В. М. [и др.]. Исследование динамических процессов с использованием анализа форм частотных декомпозиций сигнала на основе метода Прони // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2017. № 6 (75). С. 126–136. DOI: 10.18698/1812-3368-2017-6-126-136.
5. Досько С. И., Утенков В. М., Молчанов А. А. Возможности использования параметрического спектрального анализа для идентификации режима автоколебаний в станках // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 12 (73). С. 74–78. DOI: 10.30987/article\_5c0f808f755da4.36546941.
6. Анцев А. В., Пасько Н. И., Янов Е. С. [и др.]. Методика обработки вибрационных сигналов для оценки состояния режущего инструмента // Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. № 4. С. 291–296. DOI: 10.24411/2071-6168-2020-00030.
7. Анцев А. В., Янов Е. С., Данг Х. Ч. Зависимость вынужденных колебаний машинной части технологической системы в процессе резания от износа режущего инструмента // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. № 6. С. 263–272.
8. Иноземцев А. Н., Пасько Н. И., Анцев А. В. Автоматизированное управление режимами резания металлорежущих станков с использованием самообучающихся систем // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. № 12. С. 40–49.
9. Анцев А. В., Пасько Н. И. Оптимизация скорости резания и периода замены режущего инструмента в режиме статистической адаптации // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15, № 4. С. 102–110. DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.4.016.
10. Анцев А. В., Янов Е. С., Данг Ч. Х. Оптимизация режимов резания с учетом уровня вибрации на основе применения методов искусственного интеллекта // Вестник Воронежского государственного университета. 2020. Т. 16, № 3. С. 103–109. DOI: 10.25987/VSTU.2020.16.3.014.
11. Артамонов Е. В. Прочность и работоспособность сменных твердосплавных пластин сборных режущих инструментов. Тюмень: Вектор Бук, 2003. 190 с. ISBN 5-88465-416-2.
12. 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.
13. Розенберг Г. Ш., Мадорский Е. З., Голуб Е. С. [и др.]. Вибродиагностика: моногр. / под ред. Г. Ш. Розенберга. Санкт-Петербург: ПЭИПК, 2003. 284 с.
14. Сальников В. С., Жмурин В. В., Анцев А. В. Практическое применение диагностических возможностей современных многоцелевых станков // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. № 10. С. 257–264.

---

**АРТАМОНОВ Евгений Владимирович**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Станки и инструменты».

SPIN-код: 6258-2405

AuthorID (РИНЦ): 262427

ORCID: 0000-0002-3099-4435

**ВОРОНИН Владислав Вадимович**, аспирант кафедры «Станки и инструменты».

SPIN-код: 1019-3705

AuthorID (РИНЦ): 1059111

ORCID: 0000-0001-8398-740X

**ПОМИГАЛОВА Татьяна Евгеньевна**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Прикладная механика».

SPIN-код: 4151-6290

AuthorID (РИНЦ): 412525

Адрес для переписки: vladislavalbus@gmail.com

#### Для цитирования

Артамонов Е. В., Воронин В. В., Помигалова Т. Е. Исследование колебаний главной составляющей силы резания при токарной обработке // Омский научный вестник. 2021. № 6 (180). С. 5–10. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-180-5-10.

Статья поступила в редакцию 14.10.2021 г.

© Е. В. Артамонов, В. В. Воронин, Т. Е. Помигалова