

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №12 (138). С. 27-32.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №12 (138). P. 27-32.

Научная статья  
УДК 621.7  
doi:10.30987/2223-4608-2022-12-27-32

## Методика изучения вибрационных процессов при фрезеровании

Александра Анатольевна Губанова<sup>✉</sup>, к.т.н.  
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия  
anatoliya81@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9785-5384>

**Аннотация.** Представлен измерительный комплекс для оценки вибраций на металлорежущих станках фрезерной группы. Предложено экспериментальное изучение вибрационной активности процесса фрезерования концевыми фрезами, которое реализует алгоритмы преобразования колебательных ускорений в колебательные смещения. В частности, показано, что значения случайных величин из таких последовательностей способствует идентификацию стационарных траекторий упругих деформационных смещений фрезы относительно обрабатываемой детали.

**Ключевые слова:** фрезерная обработка, виброускорения, вибросмещения, скорость резания, частота вращения

**Для цитирования:** Губанова А.А. Методика изучения вибрационных процессов при фрезеровании // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №12 (138). – С. 27-32. doi: 10.30987/2223-4608-2022-12-27-32.

Original article

## Methodology for the study of vibration processes in milling operations

Alexandra A. Gubanova, Can.Sc.Tech.  
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia  
anatoliya81@mail.ru

**Abstract.** The paper presents a measurement package for evaluating vibrations of metal-cutting machines of milling system. It has been suggested to conduct an experimental study of the vibrational activity in end milling turning algorithms for converting oscillatory accelerations into vibrational displacements. In particular, it is shown that the values of random variables from such sequences contribute to the identification of stationary trajectories of rotary tool elastic deformation displacements against the workpiece.

**Keywords:** milling, vibration acceleration, vibration displacement, surface foxtail, angular velocity

**For citation:** Gubanova A. A. Methodology for the study of vibration processes in milling operations. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no. 12 (138), pp. 27-32. doi: 10.30987/2223-4608-2022-12-27-32.

### Введение

В настоящее время существует обширная номенклатура особо ответственных деталей сложной геометрической формы (автомобильная; авиакосмическая промышленность; железнодорожный транспорт и др.), к которым вносятся жёсткие требования по многим параметрам, в том числе, по качеству обрабатываемой поверхности. К таким параметрам можно отнести геометрическую точность, шероховатость и волнистость обработанной детали. Из [1 – 5] известно, что вышеуказанные параметры напрямую зависят от динамических свойств процесса фрезерования.

Известно, что процесс фрезерования – нестационарный, обусловлено это особенностью режущего инструмента. Процесс фрезерования с точки зрения математического описания представляет собой нелинейные уравнения с постоянно изменяющимися коэффициентами по причине прерывистости процесса резания зубьями фрезы. При этом возникающие вибрации не просты в анализе. В окрестности стационарной периодической траектории, в зависимости от условий, формируются различные инвариантные предельные множества – предельные циклы, инвариантные торы, хаотические аттракторы. Последние существенно

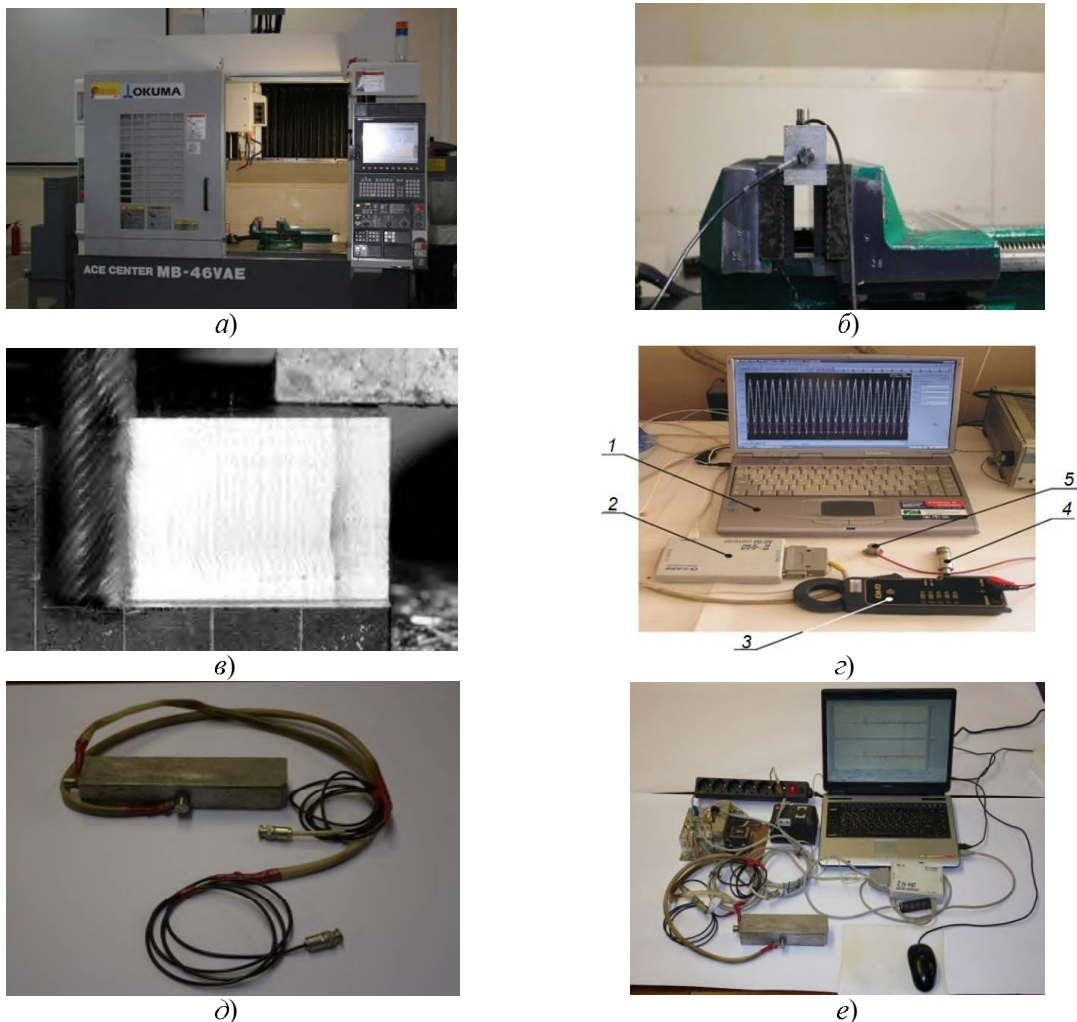
вливают на формируемый рельеф поверхности будущей детали, а следовательно, и на долговечность изделий.

Кроме указанного, вибрации при фрезеровании возникают по причине внешних возмущений: увеличения подачи, увеличения ширины среза, изменения скорости движения исполнительных элементов станка, радиальных биений шпинделя, износа режущего инструмента и др. Формирование всех вышеуказанных факторов позволяет производить сложные нелинейные наложения периодического изменения толщины срезаемого слоя, которое формирует стационарную траекторию деформационных смещений [6–10], что существенно влияет на конечный итог обработки.

### Методика исследования

В данной работе серия проведённых экспериментов выполнялась для объективного рассмотрения влияния вибраций на обрабатываемую заготовку и инструмент, за счёт измерения общего шума, который генерирует процесс резания. В ходе работы учитывались, не только параметры вибраций, но и идентифицировались основные параметры динамической характеристики процесса резания.

Апробация осуществлялась на вертикально-фрезерном обрабатывающем центре MB-46VAE (рис. 1, а). Обрабатывалась заготовка, на которой предварительно были распределены виброакселерометры, способные фиксировать виброускорения в частотном диапазоне от 10,0 Гц до 10,0 кГц (рис. 1, б).



**Рис. 1.** Проведение эксперимента на обрабатывающем центре MB-46VAE:

а – внешний вид обрабатывающего центра; б – заготовка с датчиками на столе станка; в – процесс фрезерования заготовки; г – измерительный интерфейс; д – заготовка с расположенными датчиками; е – настройка измерительного интерфейса; 1 – персональный компьютер (ПК); 2 – плату сопряжения с ПК; 3 – токоизмерительные клещи; 4 – интегратор для виброакселерометра; 5 – виброакселерометр

Для регистрации вибросмещений фрезы применялся токовихревой бесконтактный датчик с параметрами чувствительности при измерении расстояния между устройством и изме-

ряемой поверхностью – 5,0 мВ/мкм и диапазоном измерения – 2,5 мм, порогом чувствительности 1 мкм. Погрешность при этом составляла не выше 0,2 мкм.

Оценку виброакустического шума фиксировал измерительный микрофон NTIDL1, с ра-

бочим диапазоном преобразования от 25,0 Гц до 10,0 кГц (рис. 2, б).



Рис. 2. Установленные измерительные преобразователи для определения:  
а – колебаний инструмента; б – шума процесса резания

Измерения угловых перемещений шпинделя осуществлялись с использованием оптического цифрового измерительного устройства. Крутящий момент измерялся по величине мощности асинхронного двигателя шпинделя, которое рассчитывалось с помощью операции скалярного перемножения тока двигателя и напряжения. Измерение тока фиксировали измерительные клещи. Для передачи полученных сигналов в ПК применялся модуль АЦП Е14-440, представляющий собой внешнее устройство, подключённое к ПК через разъём USB. Все полученные данные по специальным алгоритмам в памяти ПК обрабатывались программными методами, в частности, использо-

вались методы экспериментальной динамики. В ходе работы также применяли виброударные молотки со встроенным датчиком силы и усилителями заряда.

### Результаты эксперимента

Рассмотрим принцип преобразования колебательных ускорений в колебательные смещения. На рис. 3 представлены временные последовательности виброускорений при обработке фрезой ( $\varnothing 40,0$  мм) латунной заготовки, при следующих значениях: величина подачи на зуб – 0,1 мм; скорость резания – 225,0 м/мин; ширина заготовки  $b = 25$  мм; угловая скорость вращения шпинделя – 1800 об/мин.

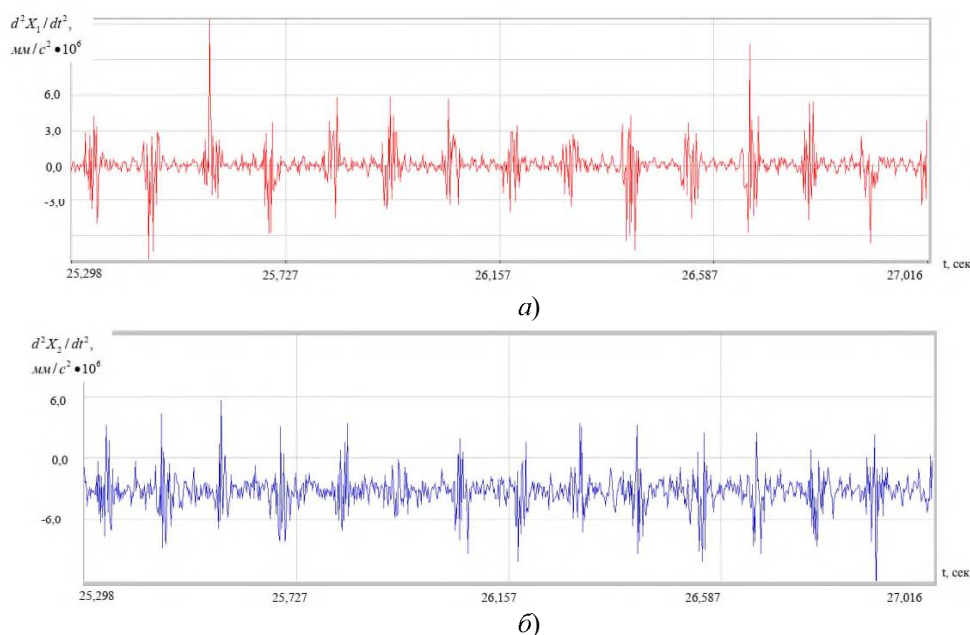


Рис. 3. Виброускорения при фрезеровании:

а – виброускорения, полученные в направлении, нормальном к поверхности резания; б – виброускорения, полученные в тангенциальном направлении

По графикам видно, что полученные колебания по двум ортогональным направлениям взаимосвязаны между собой. Это говорит о том, что для исследования природы вибраций целесообразно использовать пространственные динамические модели.

Имеющиеся значения виброускорений с помощью операции двойного интегрирования преобразовывались в вибросмещения, при этом производилась процедура удаления трендов, которые неизбежны при цифровом интегрировании. Видно из ранее представленного, что

процесс периодический и периоды виброускорений, виброскоростей и вибросмещений равны между собой. Для определения тренда использовалась операция вычисления скользящего среднего, хорошо раскрытая в работе [11], поэтому, не останавливаясь на этом, перейдем к рассмотрению примеров преобразования виброускорений в виброскорости и вибросмещения. Приведем примеры преобразования виброускорений в виброскорости и вибросмещения (рис. 4, рис. 5).

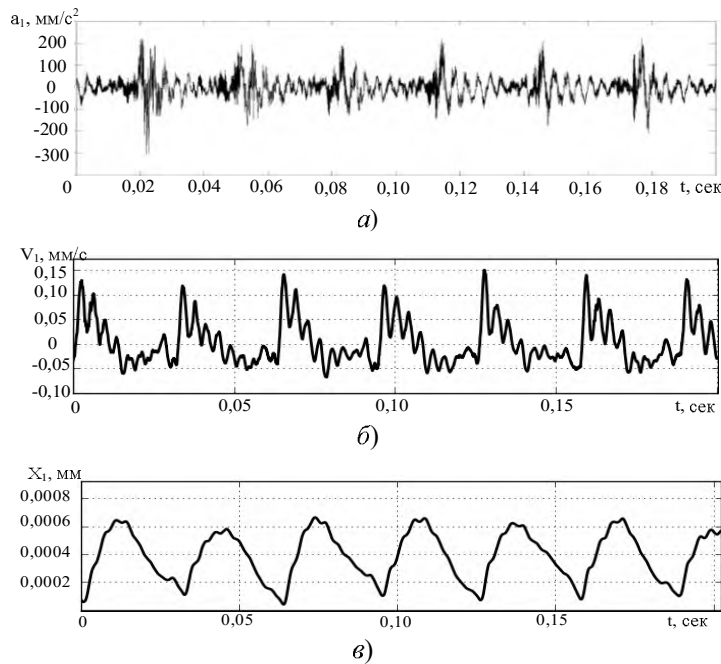


Рис. 4. Преобразование виброускорений в вибросмещения (направление  $X_1$ ):  
 $a$  – график ускорения;  $b$  – график скорости;  $в$  – график перемещения

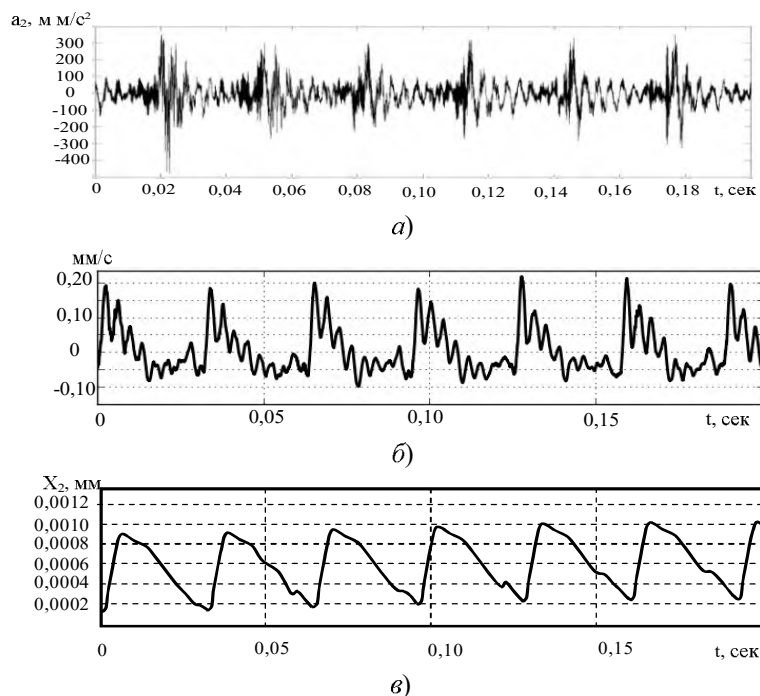


Рис. 5. Преобразование виброускорений в вибросмещения (направление  $X_2$ ):  
 $a$  – график ускорения;  $b$  – график скорости;  $в$  – график перемещения

Рассмотрим типовые траектории изменения деформационных смещений в направлении  $X_2$  (рис. 6) по мере увеличения частоты шпинделя. Частота увеличивается со 100 об/мин до 1200 об/мин. Скорость резания изменялась со-

ответственно в диапазоне: 12,5...150 м/мин. Обрабатываемый материал – 40ХН2МА. Материал инструмента – Р9К5. Ширина фрезеруемой поверхности – 10 мм.

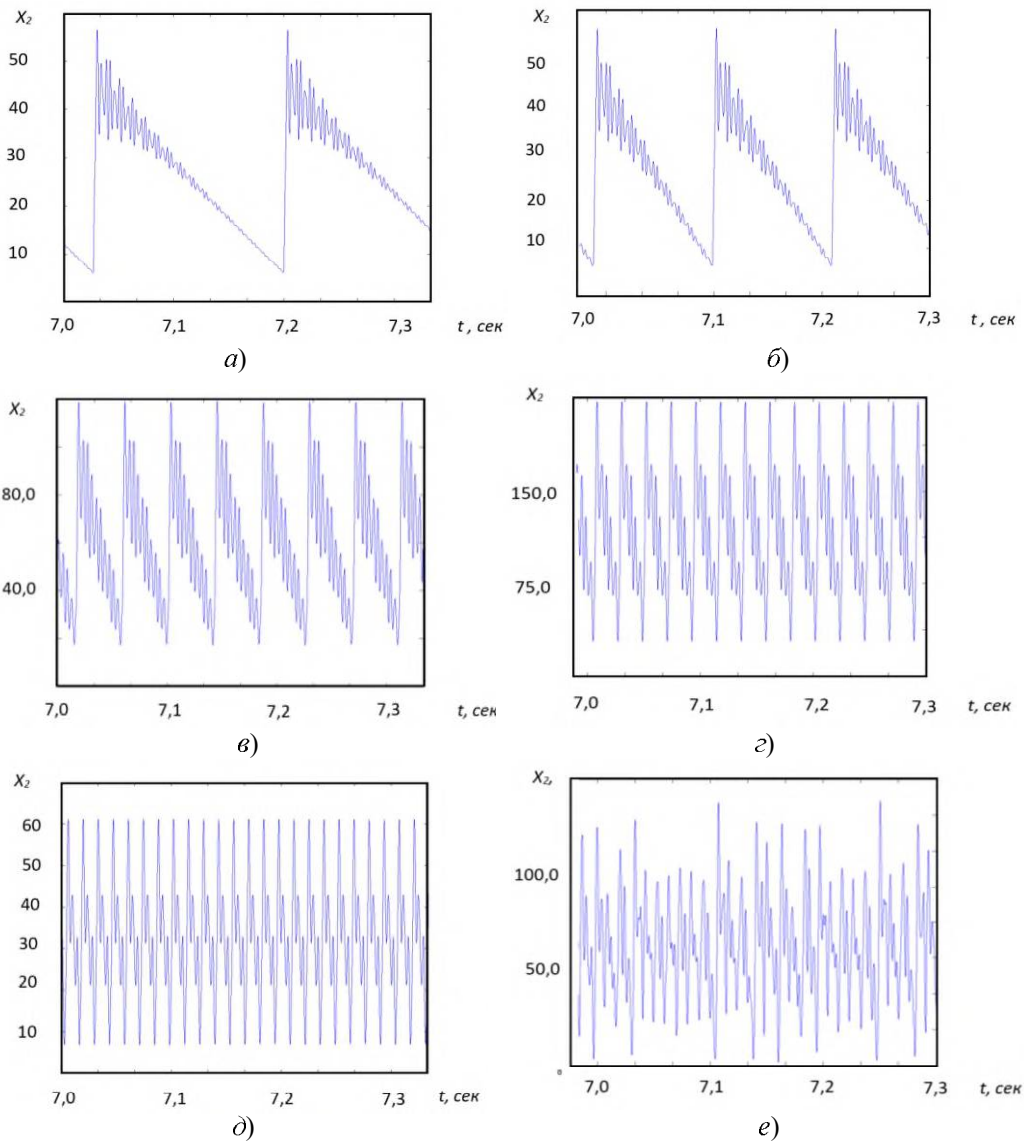


Рис. 6. Изменение установившихся вибрационных смещений в направлении  $X_2$  при вариации частоты вращения шпинделя:

а – при 100 об/мин; б – 150 об/мин; в – 400 об/мин; г – 600 об/мин; д – 1000 об/мин; е – 1200 об/мин

### Заключение

Исходя из представленного, можно констатировать выявленные особенности динамической системы фрезерования:

1. При малых скоростях совпадают периодически изменяющиеся временные зависимости. Видно, что период их характеризуется временем между двумя последовательными контактами режущих лезвий.

2. При высоких скоростях постоянные колебания превращаются в беспорядочные,

наблюдается рост амплитуды. Замечено, что установленный диапазон 80...110 м/мин более устойчив и позволяет снизить вибрации.

3. Из представленных данных видно, что на однообразные траектории изменения деформационных смещений наложены периодические колебания, которые могут позиционировать себя как затухающие (рис. 6, а, б), незатухающие (рис. 6, г, д) и как хаотические колебания (рис. 6, е).



## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Заковоротный, В., Губанова, А., Христофорова, В.** Бифуркации стационарных многообразий, формируемых в окрестности равновесия в динамической системе резания // Вестник Донского государственного технического университета. – 2015. – №1 (80). – С. 11-22.
2. **Заковоротный, В., Губанова, А., Христофорова, В.** Один случай формирования хаотических аттракторов в динамической системе резания // Вестник Донского государственного технического университета. – 2015. – №2 (81). – С. 11-21.
3. **Заковоротный, В., Фам, Д., Нгуен, Т.** Математическое моделирование и параметрическая идентификация динамических свойств подсистемы инструмента и заготовки // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2011. – № 2. – С. 38-46.
4. **Заковоротный, В., Фам, Д., Нгуен, С.** Моделирование деформационных смещений инструмента относительно заготовки при точении // Вестник Донского государственного технического университета. – 2010. – №7 (50). – С. 1005-1015.
5. **Заковоротный, В., Флек, М., Фам, Д.** Синергетическая концепция при построении систем управления точностью изготовления деталей сложной геометрической формы // Вестник Донского государственного технического университета. – 2011. – №10 (61). – С. 1785-1797.
6. **Воронов, С., Киселев, И., Аршинов, С.** Методика применения численного моделирования динамики многокоординатного фрезерования сложнопрофильных деталей при проектировании технологического процесса // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Машиностроение. – 2012. – Спец. Вып. №6. – С. 50-69.
7. **Воронов, С., Непочатов, А., Киселев, И.** Критерии оценки устойчивости процесса фрезерования нежестких деталей // Изв. ВУЗов. Машиностроение. – 2011. – №1 (610). – С. 50-62.
8. **Заковоротный, В.Л.** Управляемая эволюция динамической системы, взаимодействующей со средой // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2006. – №6 (61). – С. 84-103.
9. **Заковоротный, В., Фам, Д.** Перестройка динамической системы, взаимодействующей с процессом резания, в ходе ее эволюции // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 6 (119). – С. 49-61.
10. **Заковоротный, В., Ладник, И.** Построение информативной модели динамической системы металлорежущего станка для диагностики процесса обработки // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1991. – № 4. – С. 75.

11. **Gubanov A., Kustikov D.** Methods of experimental study of vibrational sequences during milling// XV International Scientific-Technical Conference «Dynamics of Technical Systems», DTS 2019. 2019

## REFERENCES

1. Zakovorotny V., Gubanov A., Khristoforova V. Bifurcations of stationary manifolds formed in the neighborhood of equilibrium in the dynamic cutting system. Bulletin of the Don State Technical University, 2015, no. 1(80), pp. 11-22.
2. Zakovorotny V., Gubanov A., Khristoforova V. An example of chaotic attractors formation in a dynamic cutting system. Bulletin of the Don State Technical University, 2015, no. 2 (81), pp. 11-21.
3. Zakovorotny V., Vam D., Nguyen T. Mathematical modeling and parametric identification of dynamic properties of partial system of the tool and rough piece/ Izvestiya of higher educational institutions. The North Caucasus region. Issue: Technical Sciences, 2011, no. 2, pp. 38-46.
4. Zakovorotny V., Vam D., Nguyen S. Modeling of deformation displacements of the tool against rough piece in turning/ Bulletin of the Don State Technical University, 2010, no. 7 (50), pp. 1005-1015.
5. Zakovorotny V., Fleck M., Pham D. Synergetic concept in the construction of precision control systems for manufacturing parts of complex geometric shape/ Bulletin of the Don State Technical University, 2011, no. 10, (61), pp. 1785-1797.
6. Voronov S., Kiselev I., Arshinov S. The method of numerical simulation of the dynamics of multi-coordinate milling of complex-profile parts in the process design/ Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mashinostroyeniye, 2012, Special Issue, no. 6, pp. 50-69.
7. Voronov S., Nepochatov A., Kiselev I. Stability criteria evaluation process of milling of non-rigid parts. Izvestiya vuzov. Mashinostroyeniye, 2011, no. 1, pp. 50-62.
8. Zakovorotny V.L. Controlled evolution of dynamic systems interacting with medium./ Izvestiya SFU. Technical sciences, 2006, no. 6 (61), pp. 84-103.
9. Zakovorotny V., Vam D. Restructuring of the dynamic system interacting with the cutting process during its evolution / Izvestia SFU. Technical sciences, 2011, no. 6 (119), pp. 49-61.
10. Zakovorotny V., Lednik I. Information modelling of a dynamic system of a metal-cutting machine for the diagnosis of the machining process/ Problems of machine-building and machine reliability, 1991, no. 4, p. 75.
11. Gubanov A., Kustikov D. Methods of experimental study of vibrational sequences during milling// XV International Scientific-Technical Conference «Dynamics of Technical Systems», DTS 2019. 2019.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.09.2022; одобрена после рецензирования 22.09.2022; принята к публикации 30.09.2022.

The article was submitted 10.09.2022; approved after reviewing 22.09.2022; assepted for publication 30.09.2022.