

## Влияние режимов фрезерования на шероховатость обработанной поверхности и вибрационное состояние обрабатывающего центра при попутном и встречном фрезеровании

П.Н. Костин<sup>1a</sup>, А.В. Лукьянов<sup>2b</sup>, Д.П. Алейников<sup>1c</sup>, А.С. Пятых<sup>1d</sup>

<sup>1</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия

<sup>a</sup> kostin95pavel@mail.ru, <sup>b</sup> loukian@inbox.ru, <sup>c</sup> aleynikov@istu.edu, <sup>d</sup> alexess@istu.edu

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6590-7987>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5077-5408>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9127-0713>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4116-9190>

Статья поступила 15.12.2023, принята 20.02.2024

Статья посвящена исследованию влияния режимов фрезерования на шероховатость обработанных поверхностей и вибрационное состояние обрабатывающего центра (шпиндельного узла) при попутном и встречном фрезеровании. Снижение уровня вибраций в обрабатывающей системе приводит к снижению шероховатости и увеличивает ресурс работы механообрабатывающего оборудования. Обеспечение требуемого уровня шероховатости обработанной поверхности является важной составляющей качества изделия и задается конструкторской документацией. Снизить вибрации и уменьшить шероховатость, не снижая производительности, можно, подобрав оптимальные, стабильные зоны резания. Цель исследования определяет выявление закономерностей, возникающих при фрезеровании в механообрабатывающей системе и оказывающих влияние на шероховатость поверхности. Достижение данной цели позволит управлять режимами резания, минимизируя шероховатость поверхности и сопутствующие вибрации в механообрабатывающей системе при сохранении производительности. В статье представлены результаты изучения зависимости параметров шероховатости и вибраций шпиндельного узла от режимов и направлений обработки фрезерованием. При исследовании использовались методы статистической обработки результатов эксперимента. Установлены зависимости параметров шероховатости поверхности, среднеквадратического значения виброускорения в шпиндельном узле от установленных режимов и направлений фрезерования. Измерение и контроль уровня вибраций при работе обрабатывающих центров позволяет повысить качество обработки деталей и предотвратить преждевременный выход из строя дорогостоящего станочного оборудования и продлить период стойкости режущего инструмента при высоких динамических нагрузках. Представленные результаты позволяют определить оптимальные режимы фрезерования для снижения вибраций обрабатывающей системы и шероховатости обработанной поверхности, не теряя в производительности.

**Ключевые слова:** встречное и попутное фрезерование; вибрация шпиндельного узла; шероховатость обработанной поверхности; режимы фрезерования.

## The influence of milling modes on the roughness of the machined surfaces and vibration state of the machining center for up and down milling

P.N. Kostin<sup>1a</sup>, A.V. Lukyanov<sup>2b</sup>, D.P. Aleynikov<sup>1c</sup>, A.S. Pyatykh<sup>1d</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevskiy St., Irkutsk, Russia

<sup>a</sup> kostin95pavel@mail.ru, <sup>b</sup> loukian@inbox.ru, <sup>c</sup> aleynikov@istu.edu, <sup>d</sup> alexess@istu.edu

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6590-7987>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5077-5408>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9127-0713>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4116-9190>

Received 15.12.2023, accepted 20.02.2024

The article is devoted to the study of the influence of milling modes on the surface roughness of machined surfaces and on the vibration state of the machining center (spindle unit) during up and down milling. Reducing the level of vibration in the processing system leads to a decrease in roughness and increases the service life of machining equipment. Ensuring the required level of surface roughness of the machined surface is an important component of product quality and is specified in the design documentation. It is possible to reduce vibrations and roughness without decreasing productivity by selecting optimal, stable cutting zones. The purpose of the study is to identify patterns that arise during milling in a machining system and affect surface roughness. Achieving this goal will make it possible to control cutting conditions, minimizing surface roughness and accompanying vibrations in the machining system while maintaining productivity. The article presents the results of studying the dependence of the parameters of roughness and vibration of the spindle assembly on the modes and directions of milling processing. The study used methods of statistical processing of experimental results. The dependences of the parameters of surface roughness, the root-mean-square value of vibration acceleration in the spindle assembly on the established

*milling modes and directions are established. Measuring and monitoring the level of vibrations during the operation of machining centers makes it possible to improve the quality of processing parts and prevent premature failure of expensive machine tools and extend the service life of cutting tools under high dynamic loads. The presented results allow one to determine optimal milling modes to reduce vibrations of the processing system and the surface roughness of the machined surface, without losing productivity.*

**Keywords:** up and down milling; spindle unit vibration; surface roughness of the machined surface; milling modes.

**Введение.** Качество деталей в области машиностроения определяется отклонениями в их форме и размерах, взаимным расположением элементов и параметрами шероховатости поверхностей. При этом соответствие шероховатости обработанных поверхностей установленным технологами допускам является одним из основных критериев качества изделия, поскольку шероховатость оказывает влияние на эксплуатационные свойства изделия, такие как ресурс, усталостная прочность и коррозионная стойкость деталей [1; 2].

Одной из причин, оказывающих негативное влияние на шероховатость поверхности, является вибрация в элементах технологической системы (ТС). Колебания элементов ТС приводят к неравномерной толщине срезаемого слоя, периодическому изменению сил резания, изменению величин и характера их воздействия на элементы обрабатывающей системы, что приводит к снижению ресурса работы дорогостоящего технологического оборудования и снижает период стойкости обрабатывающего инструмента.

Вибрации не позволяют использовать возможности оборудования и режущего инструмента в полной мере, поскольку при их возникновении на производстве для недопущения вышеописанных негативных последствий, как правило, занижаются режимы резания, рекомендованные производителем инструмента или технологом [3], что приводит к снижению эффективности производства. Поэтому важно найти решение данной проблемы, не прибегая к занижению режимов резания.

Конструкция обрабатывающей системы обладает двумя значимыми динамическими характеристиками: статической жесткостью, описывающей способность к упругому смещению инструмента относительно заготовки под воздействием силы резания  $P$ , и динамической деформацией, которая определяет склонность к колебаниям под воздействием возмущающей периодической силы [4–6]. Динамическая деформация зависит не только от величины активных сил во время обработки, но также от параметров колебаний, в частности, от их частоты и амплитуды. При совпадении частот этих колебаний с частотой собственных колебаний любого из элементов, образующего систему «станок – приспособление – инструмент – заготовка», возникают опасные резонансные явления [7–10].

Изучением влияния режимов фрезерования на качественные характеристики обработанной поверхности занималось множество авторов [11–14], но закономерности изменения уровня вибраций от режимов обработки фрезерованием изучены недостаточно. Принято считать, что силы резания, прямо влияющие на уровень колебаний, находятся в прямо пропорциональной зависимости от скорости резания и от изменения толщины реза. Тем не менее, на практике существенные колебания могут возникнуть и на незначительных скоростях, и

при понижении подачи инструмента, когда изменения толщины срезаемого слоя минимальны, что подтверждает сложный — нелинейный характер появления колебаний при фрезеровании.

Экспериментальные исследования вибрации и шероховатости при различных режимах обработки показали, что существенное влияние на данные параметры оказывают скорость резания ( $V_c$ ), подача на зуб ( $f_z$ ) и глубина резания ( $A_p$ ) [16]. Особенно явное влияние на шероховатость и вибрации вышеупомянутых параметров резания возникает при обработке на высокоскоростных и высокопроизводительных режимах обработки (например, при обработке алюминиевых сплавов), поскольку повышение скорости вращения шпинделя в сочетании с увеличением подачи на зуб неизбежно приводит к нелинейному увеличению динамических сил. Использование дорогостоящих обрабатывающих центров и современного режущего инструмента на таких операциях не решает полностью проблему появления вибраций. Поэтому корректно подобранные параметры обработки могут обеспечить стабильное фрезерование с минимальными колебаниями в обрабатывающей системе и низкой шероховатостью готового изделия.

Множество исследований посвящены изучению причин возникновения вибраций в процессе фрезерования [17–20], однако эти исследования, как правило, уделяют недостаточно внимания динамике обрабатывающей системы и ее составляющим компонентам, сосредотачиваясь в основном на процессе резания с точки зрения формообразования. Для изучения данных процессов были проведены эксперименты по определению воздействия режимов и направления фрезерования на вибрационное состояние шпиндельного узла обрабатывающего центра и параметр шероховатости  $R_a$  обработанной поверхности.

**Эксперимент.** В экспериментальной части работы были выполнены исследования по определению влияния режимов обработки при встречном и попутном фрезеровании на вибрационное состояние шпиндельного узла и параметр шероховатости  $R_a$  обработанной поверхности.

В качестве исследуемых факторов определялись параметры, в большей степени влияющие на шероховатость ( $R_a$ ) и динамическое состояние шпиндельного узла (среднеквадратическое значение (СКЗ) виброускорения в трех взаимно перпендикулярных направлениях колебаний для шпиндельного узла): скорость резания ( $V_c$ ), подача на зуб ( $f_z$ ) и глубина резания ( $A_p$ ). Варьирование параметров выполнено в трех уровнях (при максимальных, базовых и минимальных) значениях.

Режимы фрезерования назначены в соответствии с рекомендациями производителя инструмента, которые приведены в таблице, ширина фрезерования на всех режимах обработки оставалась постоянной  $a_e = D_c = 16$  мм.

Обработка производилась на универсальном обрабатывающем центре *HSC 75 Linear*.

**Таблица.** Режимы резания при проведении эксперимента

Фактор	Значения режимов резания		
	максимальные	базовые	минимальные
$V_c, \text{ м/мин}$	1171	950	734
$f_z, \text{ мм/зуб}$	0,16	0,14	0,12
$A_p, \text{ мм}$	2	1,25	0,5

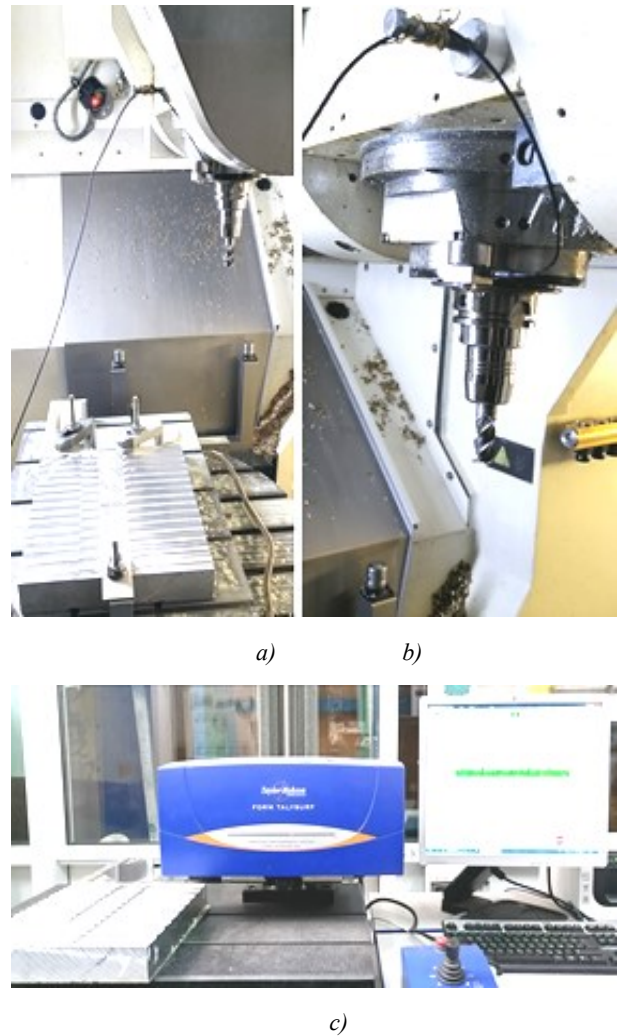
Обрабатываемая заготовка — плита из деформируемого алюминиевого сплава В95 размерами 320x280x52 мм. Обработка проводилась торцевой частью концевой фрезы *InTool In10-16-60100-EL3* с диаметром режущей части  $D_c = 16$  мм и числом зубьев  $z = 3$ . Выполнялось попутное и встречное фрезерование.

Измерение уровня вибраций в шпиндельном узле осуществлялось трехкомпонентным датчиком AP2038P-100. Данные регистрировались подключением датчиков к многоканальному преобразователю сигнала *National Instruments*. Дальнейшая обработка данных измерений вибраций осуществлялась в программе *LabVIEW Signal Express*.

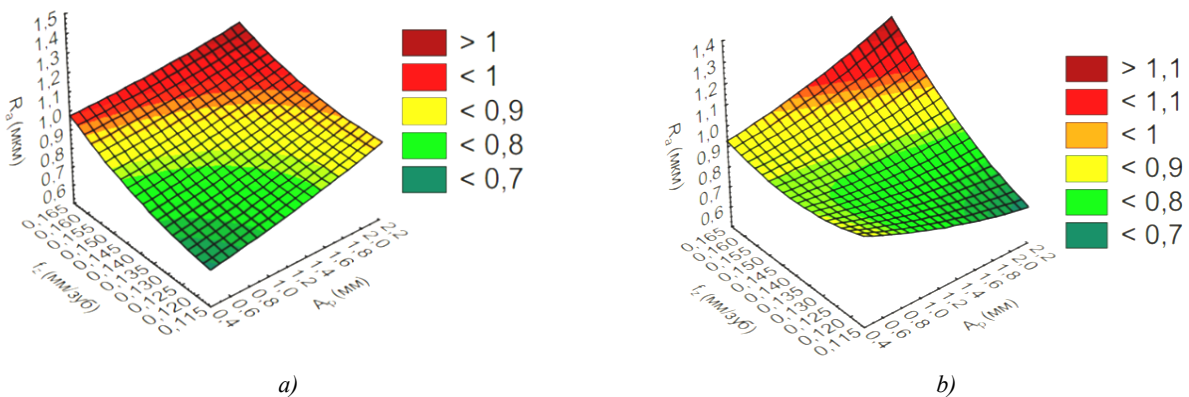
Оценка качества обработанной поверхности проводилась с использованием параметра шероховатости  $R_a$ , который измерялся на обработанной торцевой поверхности с помощью профилометра *Taylor Hobson Form Talysurf i200*. Описание методики эксперимента представлено на рис. 1.

Результаты эксперимента. На основании проведенного эксперимента с использованием программного пакета *Statistica* получены модели шероховатости и вибрационного состояния в шпиндельном узле станка в зависимости от режимов обработки и направлений резания (встречного и попутного).

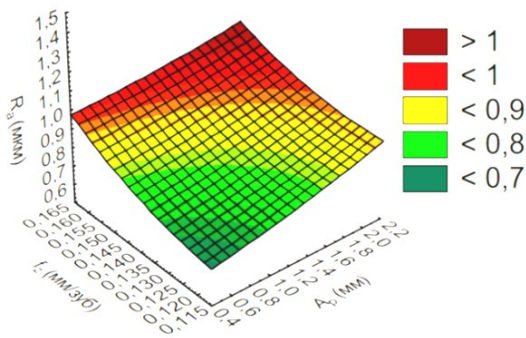
Графики, отображающие зависимость параметра шероховатости  $R_a$  обработанной поверхности от режимов обработки, представлены на рис. 2–4.



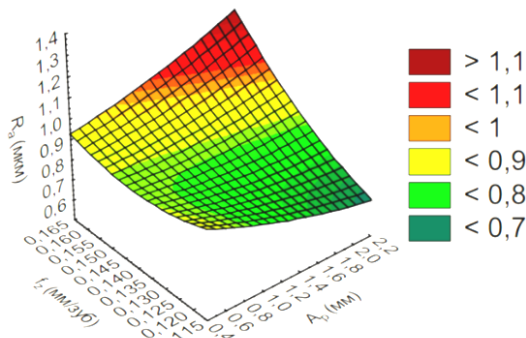
**Рис. 1.** Методика эксперимента: *a* — общий вид; *b* — измерение вибраций в шпиндельном узле датчиком AP2038P-100; *c* — измерение шероховатости профилометром *Taylor Hobson Form Talysurf i200*



**Рис. 2.** Зависимости параметра шероховатости  $R_a$  от  $V_c$  и  $f_z$ : *a* — при встречном фрезеровании; *b* — при попутном фрезеровании

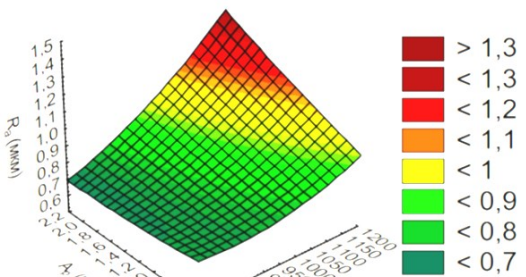


a)

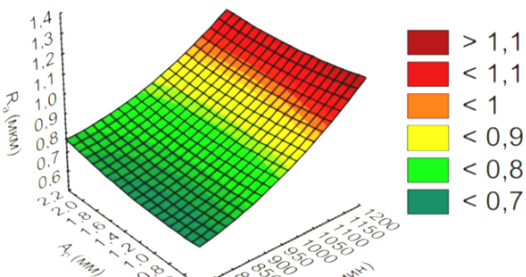


b)

Рис. 3. Зависимости параметра шероховатости  $R_a$  от  $A_p$  и  $f_z$ : *a* — при встречном фрезеровании; *b* — при попутном фрезеровании



a)



b)

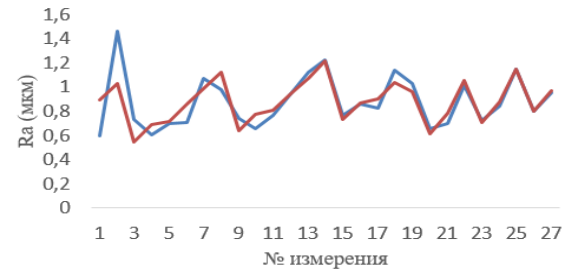
Рис. 4. Зависимости параметра шероховатости  $R_a$  от  $V_c$  и  $A_p$ : *a* — при встречном фрезеровании; *b* — при попутном фрезеровании

Зависимость шероховатости поверхности при встречном (1) и попутном (2) фрезеровании от исследуемых факторов процесса фрезерования, выраженная в уравнениях регрессии:

$$R_a \text{ встречное} = -0.63 + 0.0008 \times V_c + 4.58 \times f_z + 0.093 \times A_p \quad (1)$$

$$R_a \text{ попутное} = -0.53 + 0.0008 \times V_c + 4.73 \times f_z - 0.002 \times A_p \quad (2)$$

Графики сравнения фактических и регрессионных значений шероховатости ( $R_a$ ) представлены на рис. 5.



№ измерения

— фактические значения — регрессионные значения

a)



№ измерения

— фактические значения — регрессионные значения

b)

Рис. 5. Сравнение фактических значений  $R_a$  со значениями  $R_a$  из уравнения регрессии *a* — при встречном фрезеровании; *b* — при попутном фрезеровании

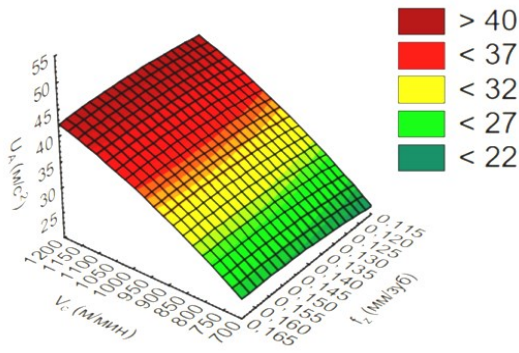
В полученных регрессионных моделях значения вероятности случайно наблюдаемых событий для всех факторов эксперимента менее 0.05, а коэффициенты детерминации  $R^2 = 0.8$  для модели встречного и  $R^2 = 0.88$  для модели попутного фрезерования, что указывает на значимость данных моделей.

По результатам фрезерования была проведена оценка вибрационных параметров с использованием усредненного вектора среднеквадратических значений виброускорения ( $m/c^2$ ) в трех взаимно перпендикулярных направлениях колебаний для шпиндельного узла (3):

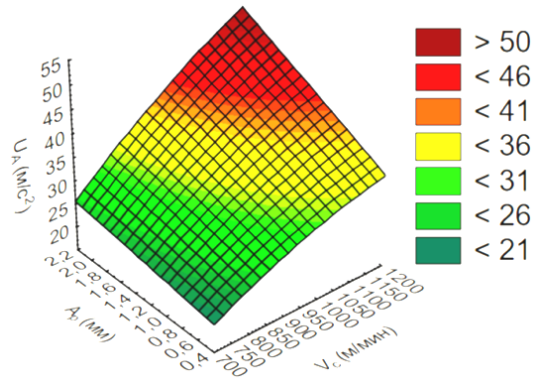
$$U_A = \sqrt{CK3_X^2 + CK3_Y^2 + CK3_Z^2} \quad (3)$$

Значение параметра СКЗ виброускорения определялось по установившемуся значению временного сигнала, исключаящему участок переходного процесса, вызванного врезанием инструмента в заготовку и холостой разгон шпинделя. Также, чтобы скорректировать воздействие свойств вибропреобразователей и удалить белый шум, исходный сигнал виброускорения был пропущен через цифровой полосовой фильтр с частотой пропускания 20 Гц.

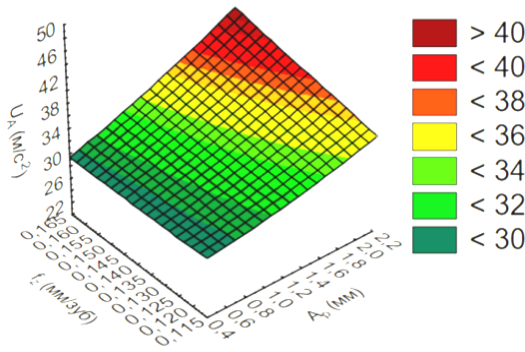
Графики значений параметра СКЗ виброускорения при встречном и попутном фрезеровании в зависимости от режимов обработки представлены на рис. 6–8.



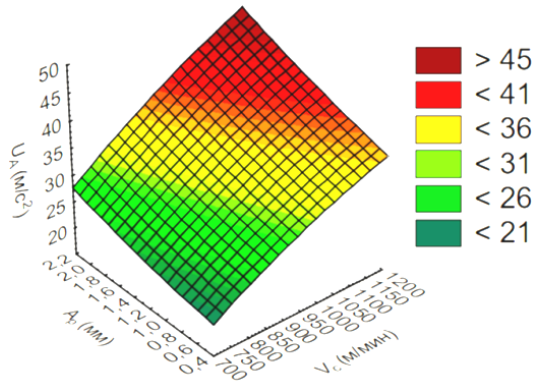
a)



a)



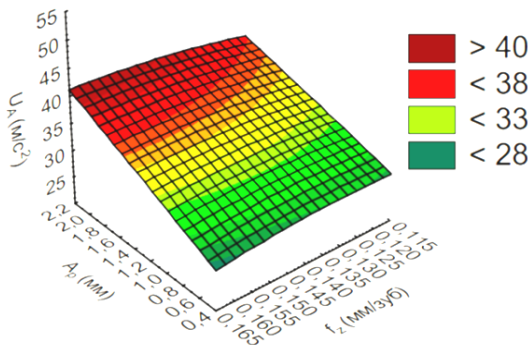
b)



b)

**Рис. 6.** Зависимости параметра СКЗ виброускорения  $U_A$  от  $V_c$  и  $f_z$  в шпиндельном узле: *a* — при встречном фрезеровании; *b* — при попутном фрезеровании

**Рис. 8.** Зависимости параметра СКЗ виброускорения  $U_A$  от  $V_c$  и  $A_p$  в шпиндельном узле: *a* — при встречном фрезеровании; *b* — при попутном фрезеровании

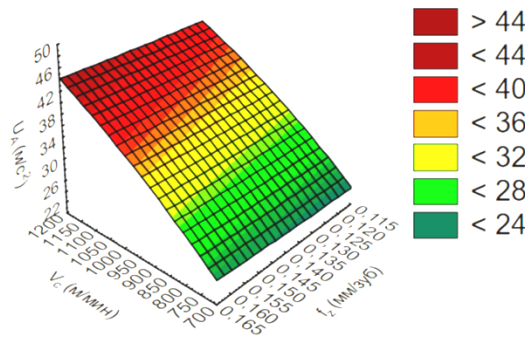


a)

Зависимости параметра СКЗ виброускорения в шпиндельном узле при встречном (4) и попутном (5) фрезеровании от исследуемых факторов процесса фрезерования:

$$U_a \text{ встречное} = -14,34 + 0,04 \times V_c + 23,8 \times f_z + 6,2 \times A_p \quad (4)$$

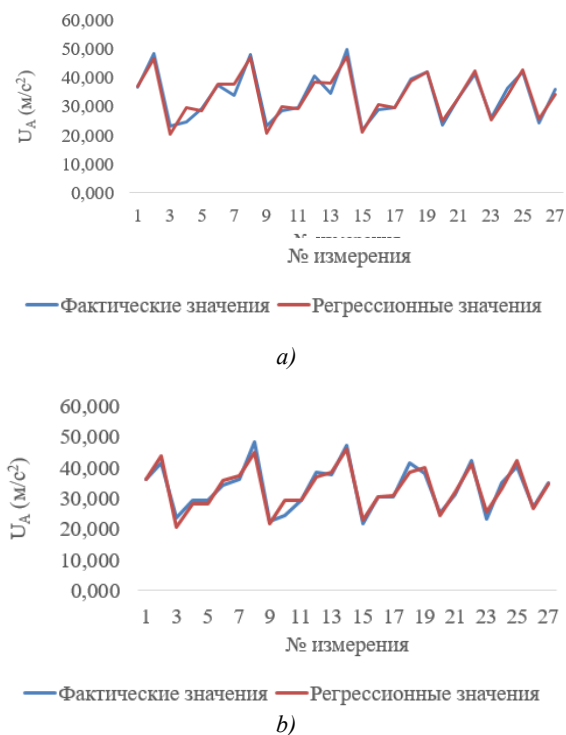
$$U_a \text{ попутное} = -15,8 + 0,036 \times V_c + 62,94 \times f_z + 5,05 \times A_p \quad (5)$$



b)

В полученных регрессионных моделях определения СКЗ виброускорений в шпиндельном узле значения вероятности случайно наблюдаемых событий для всех факторов эксперимента менее 0.05, а коэффициент детерминации  $R^2 = 0.94$  и для попутного, и для встречного фрезерования, что указывает на значимость данных моделей. Графики сравнения фактических и регрессионных значений СКЗ виброускорений ( $U_A$ ) в шпиндельном узле представлены на рис. 9.

**Рис. 7.** Зависимости параметра СКЗ виброускорения  $U_A$  от  $A_p$  и  $f_z$  в шпиндельном узле: *a* — при встречном фрезеровании; *b* — при попутном фрезеровании



**Рис. 9.** Сравнение фактических значений  $U_a$  со значениями  $U_a$  из уравнения регрессии: *a* — при встречном фрезеровании; *b* — при попутном фрезеровании

**Заключение.** В данной статье было исследовано влияние режимов фрезерования на вибрационное состояние шпиндельного узла обрабатывающего центра и шероховатость обработанной поверхности при попутной и встречной обработке. Полученные математические регрессионные модели помогают определить оптимальные режимы фрезерования для снижения вибраций в

шпиндельном узле, а также для снижения уровня шероховатости обработанной поверхности. Что приводит к улучшению качества обработки, увеличению срока службы элементов обрабатывающей системы и повышению эффективности производства.

Анализ результатов эксперимента позволяет сделать вывод о том, что зависимость вибрационного состояния шпиндельного узла и шероховатости обработанной поверхности от режимов и направлений обработки имеет нелинейный характер. Тем самым подтверждается необходимость поиска зон устойчивого резания.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение и поиск дополнительных факторов, влияющих на вибрационное состояние шпиндельного узла, разработку методов снижения уровня вибраций в остальных элементах обрабатывающей системы (заготовке, приспособлениях и инструменте) в процессе фрезерования и понижение уровня шероховатости обработанной поверхности. Также важным аспектом является объективная оценка воздействия вибраций на оборудование, их влияние на его работоспособность и ресурс. Это приводит к увеличению числа параметров, подлежащих контролю в процессе механической обработки. В частности, необходимо проводить измерение силы резания, причем важно учитывать не только конкретное значение проекции силы резания в конкретный момент времени, но также и законы ее изменения.

Также планируется заменить линейный характер уравнений регрессии для данных моделей на экспоненциальный вид для повышения их значимости.

*Работа выполнена в рамках гранта по поддержке исследований и разработок в рамках программы «Приоритет 2030».*

#### Литература

1. Гимадеев М.Р. Исследование параметров микрорельефа при фрезеровании на обрабатывающих центрах с ЧПУ // Учен. заметки ТОГУ. 2018. Т. 9, № 2. С. 61-70.
2. Сингатуллина Л.Р., Крутихина И.А., Туктамышев В.Р. Исследование шероховатости поверхности при контурном фрезеровании сложнопрофильных поверхностей деталей из нержавеющей стали // Вестн. Пермского нац. исследовательского политехнического ун-та. Аэрокосмическая техника. 2021. № 65. С. 38-44.
3. Otto A., Rauh S., Ihlenfeldt S., Radons G. Stability of milling with non-uniform pitch and variable helix Tools. *Int J Adv Manuf Technol.* 2017. 89 (9-12). P. 2613-2625.
4. Wang M., Gao L., Zheng Y. Prediction of regenerative chatter in the high-speed vertical milling of thin-walled workpiece made of titanium alloy. *Int J Adv Manuf Technol.* 2014. 72 (5-8). P. 707-716.
5. Zhang Z., Li H., Liu X., Zhang W., Meng G. Chatter mitigation for the milling of thin-walled workpiece. *Int J Mech Sci.* 2018. 138. P. 262-271.
6. Budak E., Tunc T., Alan S., Ozguven N.H. Prediction of workpiece dynamics and its effects on chatter stability in milling. *CIRP AnnManuf Technol.* 2012. 61 (1). P. 339-342.
7. Sun C., Altintas Y. Chatter free tool orientations in 5-axis ball-end milling. *Int J Mach Tool Manuf.* 2016. 106. P. 89-97.
8. Костин П.Н., Лукьянов А.В. Коррекция частоты вращения шпинделя при фрезеровании по данным численного моделирования системы: приспособление-инструмент заготовка // Вестн. Иркутского гос. технического ун-та. 2019. № 1. С. 54-62.
9. Костин П.Н., Лукьянов А.В., Алейников Д.П. Коррекция режимов резания по данным численного моделирования динамики системы инструмент-заготовка с учетом резонансов // Вестн. Иркутского гос. технического ун-та. 2020. № 5. С. 993-1006.
10. Altintas Y. *Manufacturing Automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design.* New York: Cambridge University Press, 2012. 366 p.
11. Купцов В.Р., Зарубин С.Г., Зеленский А.А. Повышение точности контурного фрезерования профиля зубчатого венца циклоидального колеса на токарно-фрезерном многоцелевом станке // Вестн. МГТУ Станкин. 2016. № 3 (38). С. 22-27.
12. Козлов А.М., Кирющенко Е.В., Кузнецов С.Ф. Фрезерование сложных деталей с коррекцией положения инструмента // Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2016. № 8-2. С. 111-119.
13. Козлов А.М., Малютин Г.Е. Управление процессом чистой обработки поверхностей сложной формы на фрезерных станках с ЧПУ // Научные технологии в машиностроении. 2018. № 4 (82). С. 29-37.
14. Чутвериков И.А., Ельникова И.С. Регулирование технологических режимов при обработке сложнопрофильных поверхностей заготовки // Инновации и инвестиции. 2015. № 11. С. 239-242.
15. Лукьянов А.В., Алейников Д.П. Исследование пространственной вибрации обрабатывающего центра в режиме

фрезерования // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 1 (21). С. 96-101.

16. Lei N., Soshi M. Vision-based system for chatter identification and process optimization in high-speed milling. *Int J Adv Manuf Technol.* 2017. 89 (9-12). P. 2757-2769.
  17. Алейников Д.П., Лукьянов А.В. Исследование динамики крепления датчиков вибрации шпинделей обрабатывающих центров // Вестн. Иркутского гос. технического ун-та. 2015. № 2 (97). С. 28-35.
  18. Campatelli G., Scippa A. Prediction of milling cutting force coefficients for Aluminum 6082-T4. *Conference on High Performance Cutting.* 2012. P. 563-568.
  19. Voronov S.A., Kiselev I.A. Dynamics of flexible detail milling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K // Journal of Multi-body Dynamics.* 2011. V. 225, № 4. P. 299-309.
  20. Biermann D., Kersting P., Surmann T. A general approach to simulating workpiece vibrations during five-axis milling of turbine blades // *CIRP annals.* 2010. V. 59, № 1. P. 125-128.
- References*
1. Gimadeev M.R. Investigation of microrelief parameters during milling on CNC machining centers // *Scientists notes PNU.* 2018. V. 9, № 2. P. 61-70.
  2. Singatullina L.R., Krutihina I.A., Tuktamyshev V.R. Study of surface roughness during contour milling of complex-profile stainless steel parts // *Bulletin of the Perm national research polytechnic university. Aerospace engineering.* 2021. № 65. P. 38-44.
  3. Otto A., Rauh S., Ihlenfeldt S., Radons G. Stability of milling with non-uniform pitch and variable helix Tools. *Int J Adv Manuf Technol.* 2017. 89 (9-12). P. 2613-2625.
  4. Wang M., Gao L., Zheng Y. Prediction of regenerative chatter in the high-speed vertical milling of thin-walled workpiece made of titanium alloy. *Int J Adv Manuf Technol.* 2014. 72 (5-8). P. 707-716.
  5. Zhang Z., Li H., Liu X., Zhang W., Meng G. Chatter mitigation for the milling of thin-walled workpiece. *Int J Mech Sci.* 2018. 138. P. 262-271.
  6. Budak E., Tunc T., Alan S., Ozguven N.H. Prediction of workpiece dynamics and its effects on chatter stability in milling. *CIRP AnnManuf Technol.* 2012. 61 (1). P. 339-342.
  7. Sun C., Altintas Y. Chatter free tool orientations in 5-axis ball-end milling. *Int J Mach Tool Manuf.* 2016. 106. P. 89-97.
  8. Kostin P.N., Luk'yanov A.V. Correction of the spindle speed during milling according to the numerical simulation of the system: fixture-tool-workpiece // *Bulletin of Irkutsk State Technical University.* 2019. № 1. P. 54-62.
  9. Kostin P.N., Luk'yanov A.V., Alejnikov D.P. Correction of cutting modes according to the data of numerical simulation of the dynamics of the tool-workpiece system, taking into account resonances // *Bulletin of Irkutsk State Technical University.* 2020. № 5. P. 993-1006.
  10. Altintas Y. *Manufacturing Automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design.* New York: Cambridge University Press, 2012. 366 p.
  11. Kupcov V.R., Zarubin S.G., Zelenskij A.A. Improving the accuracy of contour milling of the profile of a gear rim of a cycloidal wheel on a turning-milling center // *Vestnik MSTU "Stankin".* 2016. № 3 (38). P. 22-27.
  12. Kozlov A.M., Kiryushchenko E.V., Kuznecov S.F. Milling complex parts with tool offset // *News of the Tula State University (Izvestija TulGU). Technical sciences.* 2016. № 8-2. P. 111-119.
  13. Kozlov A.M., Malyutin G.E. Controlling the finishing process of complex surfaces on CNC milling machines // *Science intensive technologies in mechanical engineering.* 2018. № 4 (82). P. 29-37.
  14. CHutverikov I.A., El'nikova I.S. Regulation of technological modes during processing of complexly shaped workpiece surfaces // *Innovacii i investicii.* 2015. № 11. P. 239-242.
  15. Luk'yanov A.V., Alejnikov D.P. Research of vibration machining center in milling mode // *Systems. Methods. Technologies.* 2014. № 1 (21). P. 96-101.
  16. Lei N., Soshi M. Vision-based system for chatter identification and process optimization in high-speed milling. *Int J Adv Manuf Technol.* 2017. 89 (9-12). P. 2757-2769.
  17. Alejnikov D.P., Luk'yanov A.V. Studying fixation dynamics of machining center spindle vibration sensors // *Bulletin of Irkutsk State Technical University.* 2015. № 2 (97). P. 28-35.
  18. Campatelli G., Scippa A. Prediction of milling cutting force coefficients for Aluminum 6082-T4. *Conference on High Performance Cutting.* 2012. P. 563-568.
  19. Voronov S.A., Kiselev I.A. Dynamics of flexible detail milling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K // Journal of Multi-body Dynamics.* 2011. V. 225, № 4. P. 299-309.
  20. Biermann D., Kersting P., Surmann T. A general approach to simulating workpiece vibrations during five-axis milling of turbine blades // *CIRP annals.* 2010. V. 59, № 1. P. 125-128.