

Исследование колебаний сил взаимодействия фрезы с заготовкой при попутном и встречном фрезеровании

А.В. Лукьянов¹✉, Д.П. Алейников², П.Н. Костин³

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

²Восточно-Сибирский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации, г. Иркутск, Российская Федерация

³Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉loukian@inbox.ru

Резюме

В статье представлены результаты изучения колебаний сил взаимодействия между инструментом и заготовкой при попутном и встречном фрезеровании с целью определения оптимальных режимов резания и их влияния на шероховатость обработанных поверхностей. Авторами проведены экспериментальные исследования процессов фрезерования на обрабатывающем центре HSC 75 DMG и DMC-635 в различных режимах обработки при попутном и встречном фрезеровании с одновременной регистрацией трехмерных вибраций силы резания в точке контакта концевой фрезы с деталью. Для регистрации пространственных составляющих сил резания при фрезеровании использовался установленный на обрабатывающем центре динамометрический стол фирмы «Kistler». Анализ данных с применением специализированного программного обеспечения, методов виброизмерения и вибродиагностики показал, что при значительных угловых скоростях вращения шпинделя в некоторых режимах обработки фреза взаимодействует с заготовкой существенно неравномерно, что ухудшает качество фрезерования и приводит к преждевременному износу инструмента. При изменении угловой скорости вращения шпинделя возникают резонансы в шпинделе, инструменте, в системе крепления и в самой заготовке, что приводит к значительной флуктуации сил фрезерования. В спектре вибрации сил фрезерования возникают многочисленные гармонические составляющие, что связано с нарушением взаимного контакта режущих кромок инструмента с заготовкой. Построение графиков орбит колебаний, проекции сил резания на оси координат, вычисление тангенциальных и радиальных силовых воздействий подтверждают результаты исследования и способствуют определению дополнительных критериев оценки физико-технических процессов резания. Подобные критерии могут использоваться в системах мониторинга и виброзащиты станочного оборудования для обеспечения адаптивного контроля и автоматической коррекции режимов резания.

Ключевые слова

вибрация при фрезеровании, вибродиагностика механообрабатывающего оборудования, адаптивный контроль резания, мониторинг вибрации, коррекция режимов резания

Для цитирования

Лукьянов А.В. Исследование колебаний сил взаимодействия фрезы с заготовкой при попутном и встречном фрезеровании / А.В. Лукьянов, Д.П. Алейников, П.Н. Костин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3(75). – С. 38–49. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).38-49.

Информация о статье

поступила в редакцию: 16.09.2022 г.; поступила после рецензирования: 22.09.2022 г.; принята к публикации: 23.09.2022 г.

Investigation of oscillations in the forces of interaction of the milling cutter with the workpiece during passing and counter milling

A.V. Luk'yanov¹✉, D.P. Aleinikov², P.N. Kostin³

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

²East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, Irkutsk, the Russian Federation

³Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

✉loukian@inbox.ru

Abstract

The article presents the results of a study of fluctuations in the forces of interaction between the tool and the workpiece during climb and counter milling in order to determine the optimal cutting conditions and their effect on the quality of machined surfaces. On the basis of a number of experiments on the processing of the workpiece on a modern machining center HSC 75 DMG and DMC-635 in various cutting modes with climb and counter milling, the characteristics of spatial fluctuations in the interaction force of the end mill with the workpiece were obtained. To register the spatial components of the cutting forces during milling, a Kistler torque table installed on the machining center was used. Data analysis using specialized software and vibration theory methods showed that at high spindle speeds in a number of processing modes, the cutting edges of the cutter interact with the workpiece unevenly, which reduces the quality of milling and leads to premature tool wear. When changing the angular frequen-

cy of rotation of the spindle, resonances arise in the spindle, in the tool, in the fastening system and in the workpiece itself, which leads to a significant fluctuation of the milling forces. Numerous harmonic components appear in the vibration spectrum of milling forces, which is associated with a violation of the mutual contact of the cutting edges of the tool with the workpiece. Plotting oscillation orbits, projections of cutting forces on the coordinate axes, calculation of tangential and radial force effects confirm the results of the study and contribute to the determination of additional criteria for assessing physical and technical cutting processes. Similar criteria can be used in monitoring and vibration protection systems for machine tools to provide adaptive control and automatic correction of cutting conditions.

Keywords

vibration during milling, vibration diagnostics of machining equipment, adaptive cutting control, vibration monitoring, cutting mode correction

For citation

Luk'yanov A.V, Aleinikov D.P., Kostin P.N. Issledovanie kolebaniy sil vzaimodeistviya frezy s zagotovkoi pri poputnom i vstrechnom frezerovanii [Investigation of oscillations in the forces of interaction of the milling cutter with the workpiece during passing and counter milling]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 3 (75), pp. 38–49. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.3(75).38-49.

Article Info

Received: September 16, 2022; Revised: September 22, 2022; Accepted: September 23, 2022.

Введение

От взаимного направления скоростей вращения фрезы и подачи заготовки (линейного перемещения фрезы) различают два вида фрезерования: попутное и встречное. Попутным называют вариант резания, при котором линейная скорость подачи заготовки совпадает с направлением окружной скорости вращения фрезы (рис. 1).

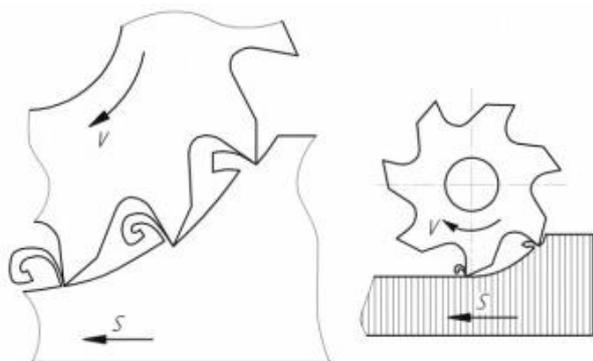


Рис. 1. Схема попутного фрезерования

Fig. 1. Downhill milling scheme

При попутном резании зубья фрезы в начальный момент контакта с заготовкой нагружаются резко (скачкообразно), при этом происходит ударное воздействие с поверхностью заготовки, что неизбежно приводит к снижению ресурса инструмента [1–5]. При этом толщина стружки максимальна в начале фрезерования и плавно снижается до нуля на выходе из зоны резания. Это позволяет избежать «затирания» рабочих кромок фрезы и упрочнения поверхностного слоя в начальные моменты снятия

металла [6]. Максимальная толщина стружки на входе дает определенные преимущества, так как происходит прижатие фрезы к заготовке под действием сил резания, что обеспечивает постоянный контакт с материалом. Прижатие фрезы к заготовке приводит к непреднамеренному увеличению параметра подачи на зуб, что, в свою очередь, вызывает увеличение снимаемой толщины стружки и, как следствие, преждевременному износу режущих кромок [7–12]. Для снижения данных негативных последствий рекомендуется применять встречное фрезерование.

Зубья фрезы в начальный момент взаимодействия с заготовкой прижимают ее к опорной поверхности, в связи с чем увеличивается жесткость сопряжения и повышается точность обработки.

На рис. 2 показана схема встречного фрезерования, когда направление окружной скорости фрезы и подачи противоположны.

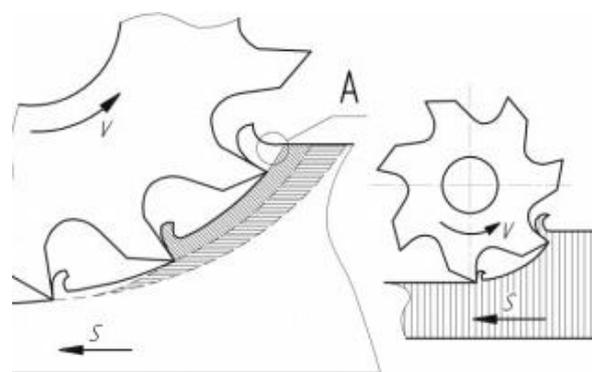


Рис. 2. Схема встречного фрезерования

Fig. 2. Uphill milling scheme

В случае неподвижной заготовки ее линейная скорость эквивалентна линейной скорости фрезы. При встречном фрезеровании толщина стружки изменяется от нуля в начале взаимодействия фрезы с заготовкой и до максимума в конце.

Режущая кромка зуба фрезы в момент начала взаимодействия начинает скользить по поверхности заготовки до момента пока трение достигнет критической величины и начнется врезание зуба в заготовку. Трение и «выглаживание» поверхности заготовки может привести к упрочнению ее поверхностного слоя, к отжиму фрезы, повышению температуры и упрочнению поверхностного слоя заготовки [13, 14]. Большая температура и значительные растягивающие напряжения негативно влияют на стойкость инструмента, вызывают налипание или наваривание стружки на режущие кромки фрез, что приводит к их частой поломке. Деформации в обрабатываемой системе, сопровождающиеся возникновением вибраций, приводят к снижению качества обрабатываемой поверхности [15–20].

Радиальные силы фрезерования стремятся оторвать заготовку от стола. Встречное фре-

зерование эффективно при больших значениях припуска на обработку, при обработке жаропрочных сплавов с помощью керамических пластин, так как керамика чувствительна к нагрузкам, возникающим при врезании [4].

Попутное фрезерование применяется при фрезеровании на жестком оборудовании; чистовой обработке; снятии относительно небольшого слоя за проход; обработке слабо уплотненных материалов на поверхности.

Встречное фрезерование рационально при предварительной обработке материалов и обработке поверхностно плотных материалов.

Целью исследования является изучение колебаний сил взаимодействия между инструментом и заготовкой при попутном и встречном фрезеровании для определения оптимальных режимов резания и их влияния на качество обработанных поверхностей. Для достижения поставленной цели осуществлялось исследование сил резания на обрабатывающем центре HSC 75 DMG и DMC-635 при взаимодействии режущей части инструмента с заготовкой, установленной на динамометрическом столе «Kistler» (рис. 3). Полученные данные трех



Рис.3. Динамометрический стол фирмы «Kistler» на обрабатывающем центре DMC-635

Fig. 3. Kistler torque table on DMC-635 machining center torque table

компонентов сил резания анализировались в программе «DynaWare» фирмы «Kistler».

Материалы и методы исследования

Механообработка выполнялась фрезой диаметром $d = 25$ мм; число режущих кромок $z = 2$; режимы резания назначались в соответствии с рекомендациями производителя инструмента

для попутного и встречного фрезерования; глубина резания $a_p = 1$ и 2 мм, ширина резания $a_e = 5$ мм; подача на зуб $f_z = 0,2$ мм; скорость резания $V_c = 235,5$ м/мин, угловая скорость вращения фрезы $n = 3\,000$ об/мин; оборотная частота $f_o = 50$ Гц; зубцовая частота $f_s = 100$ Гц; период оборотной частоты $T_o = 20$ мс; период зубцовой частоты $T_s = 10$ мс.

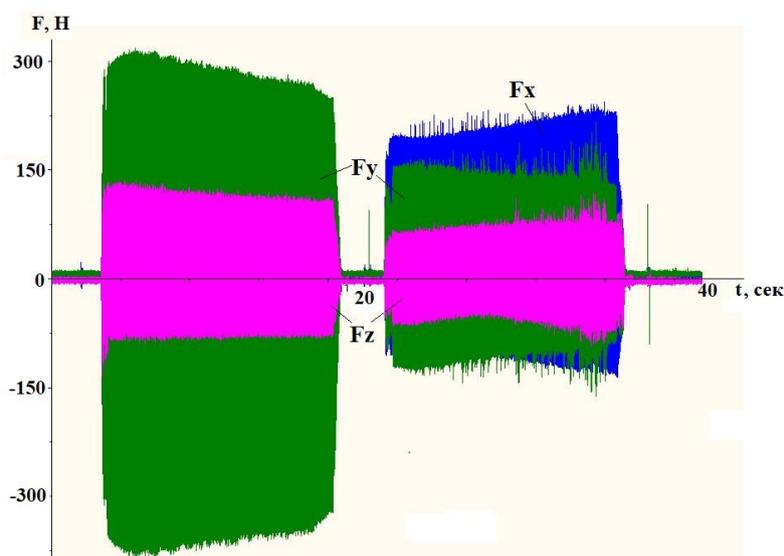


Рис. 4. Колебания проекций силы фрезерования при глубине резания 1 мм: попутное (0–20 с) и встречное (20–40 с) фрезерование
Fig. 4. Fluctuations in the projections of the milling force at a depth of cut of 1 mm: downhill (0–20 s) and uphill (20–40 s) milling

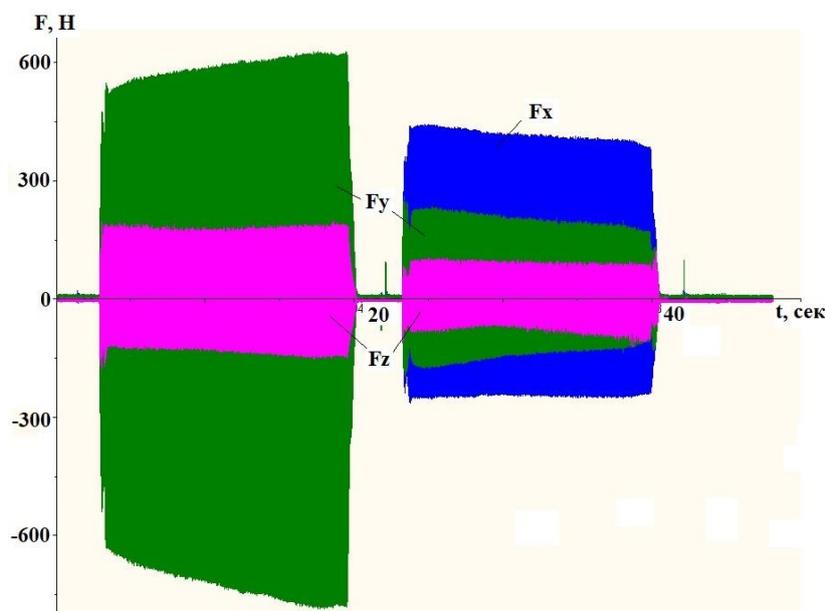


Рис. 5. Колебания проекций силы фрезерования при глубине резания 2 мм: попутное (0–20 с) и встречное (20–40 с) фрезерование
Fig. 5. Fluctuations in the projections of the milling force at a depth of cut of 2 mm: downhill (0–20 s) and uphill (20–40 s) milling

Осциллограммы проекций сил резания F_x , F_y , F_z (вдоль, поперек и перпендикулярно плоскости фрезерования) с глубиной резания 1 и 2 мм при попутном и встречном направлении фрезерования представлены на рис. 4 и 5. Графики указывают, что амплитуда на некоторых частотах сил резания при попутном фрезеровании значительно выше, чем при встречном фрезеровании.

Основной спектральной составляющей вибрационного процесса фрезерования должна быть зубцовая частота. При геометрическом неравенстве режущих кромок и при резонансах станка должна проявляться гармоника оборотной частоты. Нелинейный характер вибрации при ударно-периодическом взаимодействии режущих кромок фрезы с заготовкой проявляется в наличии нескольких гармоник зубцовой

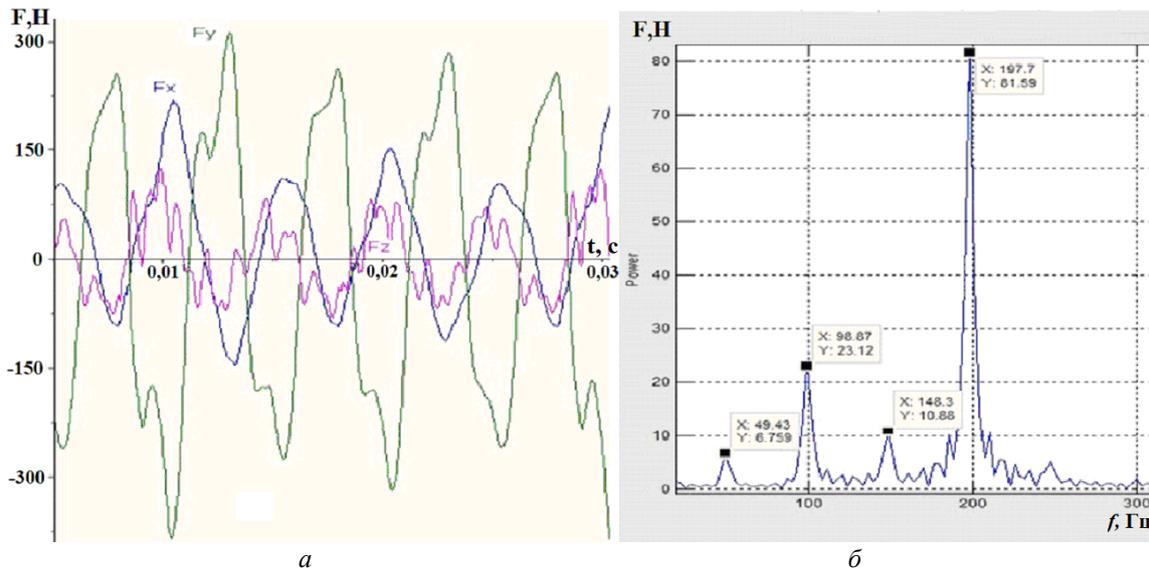


Рис. 6. Фрагмент осциллограммы колебаний составляющих силы фрезерования (а) и спектр силы по оси X (б) при попутном фрезеровании (глубина резания 1 мм)

Fig. 6. A fragment of the oscillogram of fluctuations in the components of the milling force (a) and the force spectrum along the X axis (b) during climb milling (cutting depth 1 mm)

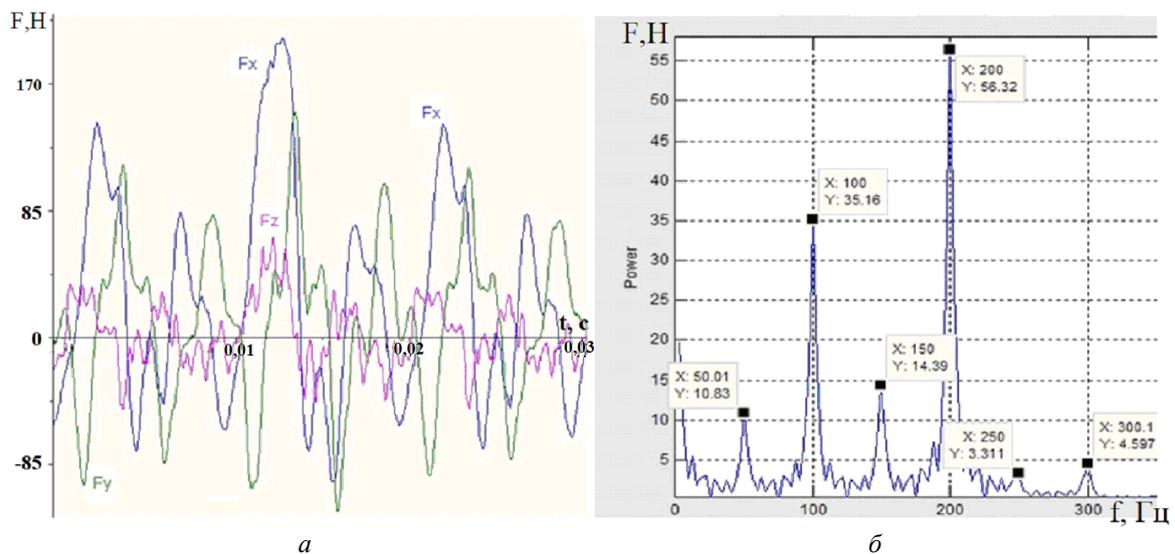


Рис. 7. Фрагмент осциллограммы колебаний по трем координатам силы фрезерования (а) и спектр силы по оси X (б) при встречном фрезеровании (глубина резания 1 мм)

Fig. 7. A fragment of the oscillogram of fluctuations in the components of the milling force (a) and the spectrum of the force along the X axis (b) during uphill milling (cutting depth 1 mm)

частоты. На практике наиболее значительной является вторая гармоника, превышающая на некоторых режимах обработки в 2–10 раз амплитуду зубцовой гармоники, что свидетельствует о существенно нелинейном характере силового взаимодействия фрезы и заготовки. При попутном фрезеровании сечение стружки в момент входа резца в металл будет больше, чем при его выходе, а направление движения режущей кромки будет близко к направлению подачи. На рис. 6 представлены осциллограммы колебаний составляющих силы фрезерования по трем координатам и спектр силы при попутном фрезеровании.

При встречном фрезеровании в момент начала прохода сечение стружки будет существенно меньшим, чем при его выходе. Окружная скорость режущей кромки V в процессе резания осуществляется всегда навстречу движению подачи S . На рис. 7 представлены осциллограммы трехмерных колебаний и спектр силы фрезерования при встречной обработке. Значения проекций среднеквадратических значений

(СКЗ) сил резания и соответствующие им спектральные составляющие в направлениях X , Y , Z представлены в табл.

Сравнительный анализ СКЗ сил резания при попутном и встречном фрезеровании показал, что поперечная и вертикальная составляющие силы резания F_y и F_z увеличились при попутном фрезеровании в 2,5–3,8 раз (глубины обработки 1 и 2 мм), а продольная составляющая F_x уменьшилась на 20 % в сравнении со встречным фрезерованием.

Сравнительный анализ спектральных составляющих вибрации сил резания при попутном и встречном фрезеровании показывает следующее:

1. На глубинах обработки 1 и 2 мм по координате X амплитуды почти всех гармоник при попутном фрезеровании уменьшаются на 10–45 % по сравнению со встречным фрезерованием, кроме гармоники 200 Гц (глубина 1 мм), на которой при попутном фрезеровании происходит увеличение на 45 %.

2. На тех же глубинах обработки 1 и 2 мм

Анализ среднеквадратичных значений проекций сил резания и спектральных составляющих этих сил по трем направлениям
Analysis of square deviation projections of cutting forces and spectral components of these forces in three directions

Вид резания	Проекция среднеквадратичного значения силы фрезерования, Н			Спектральные составляющие по оси X, Н				
	F_x	F_y	F_z	50 Гц	100 Гц	150 Гц	200 Гц	
Глубина фрезерования 1 мм								
Попутное	60,6	129,2	28,7	6,7	23	10,9	81,6	
Встречное	48,6	35,4	11,7	10,8	35,2	14,4	56,3	
<u>Попутное</u> Встречное	1,2	3,6	2,5	0,6	0,7	0,8	1,5	
Глубина фрезерования 2 мм								
Попутное	84,6	199	42,1	14,1	42,6	23,6	116,2	
Встречное	110,5	52,4	16,2	24,5	76,3	36,8	129,0	
<u>Попутное</u> Встречное	0,8	3,8	2,6	0,6	0,6	0,6	0,9	
Спектральные составляющие по оси Y, Н				Спектральные составляющие по оси Z, Н				
Вид резания	50 Гц	100 Гц	150 Гц	200 Гц	50 Гц	100 Гц	150 Гц	200 Гц
Глубина фрезерования 1 мм								
Попутное	6,5	17,8	4,2	181,7	3,7	6,9	3,4	39,7
Встречное	1,5	7,1	3,5	49,4	4,3	8,7	3,8	13
<u>Попутное</u> Встречное	4,3	2,5	1,2	3,7	0,9	0,8	0,9	3,1
Глубина фрезерования 2 мм								
Попутное	16,3	38	13,6	278,3	4,0	8,7	4,5	58,6
Встречное	5,1	15,4	7,5	72,1	3,6	8,9	3,8	20,4
<u>Попутное</u> Встречное	3,2	2,5	1,8	3,9	1,1	1,0	1,2	2,9

по координате Y при попутном фрезеровании увеличение вибрации в 1,2–4,3 раза по сравнению со встречным фрезерованием.

3. По координате Z при попутном фрезеровании вибрация остается почти на том же уровне на частотах 50–150 Гц и увеличивается в 3 раза на частоте 200 Гц по сравнению со встречным фрезерованием.

В результате анализа СКЗ осциллограмм колебаний и спектров сил по трем направлениям при попутном и встречном фрезеровании можно констатировать, что попутное фрезерование при глубинах обработки 1 и 2 мм создает в поперечном и вертикальном направлениях в 2,5–3,8 раз большие вибрационные нагрузки, чем встречное фрезерование (за исключением оси X вдоль направления обработки, когда виб-

рация сил резания уменьшается на 10–30 %).

По проекциям силы резания на оси X и Y попутного фрезерования (см. рис. 6, *a*) была построена орбита за период зубцовой частоты (рис. 8). Орбита на данном рисунке замкнута, что свидетельствует об отсутствии кратковременного разрыва контактирующих поверхностей фрезы с заготовкой. Деформация формы орбиты обусловлена различной амплитудой колебаний по координатам и наличием второй гармоники зубцовой частоты.

На рис. 9 приведена орбита силы попутного фрезерования за период оборотной частоты. Орбита образуется суммой двух орбит зубцовой частоты. Орбита замкнута, однако орбиты зубцовой частоты несколько смещены относительно друг друга и не являются полной ко-

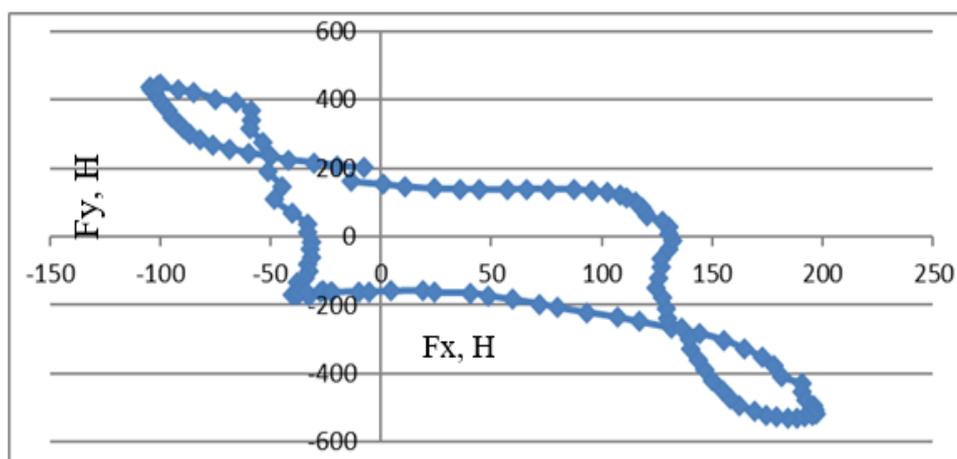


Рис. 8. Орбита сил резания за период зубцовой частоты 1,57 мс
Fig. 8. Orbit of cutting forces for the period of tooth frequency 1,57 ms

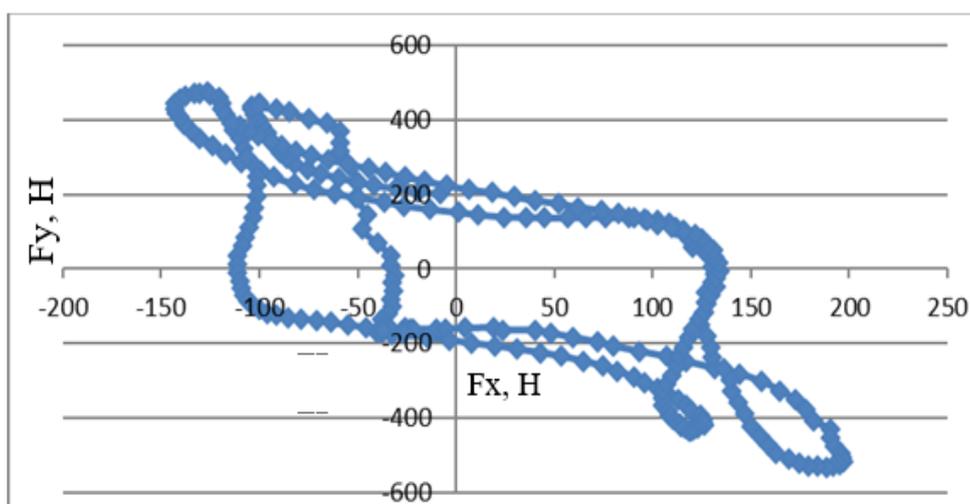


Рис. 9. Орбита сил резания за период оборотной частоты 3,14 мс
Fig. 9. Orbit of cutting forces per revolution frequency period 3,14 ms

пией одна другой, что свидетельствует о некоторых различиях в работе каждой из двух режущих кромок фрезы.

При попутном фрезеровании орбиты сил за период зубцовой и оборотных частот замкнуты, что свидетельствует о стабильной работе всех режущих кромок на участках снятия стружки.

Из приведенных на рис. 8 и 9 орбит сил резания можно сделать вывод, что режущие кромки фрезы работают в несколько различных условиях, что объясняется различием геометрических и функциональных параметров каждой из двух режущих кромок, а это влияет на качество механообработки (в основном на шероховатость поверхности). Несовпадающие характеристики работы двух кромок подтверждаются наличием пика оборотной частоты в спектрах вибросигнала. Вклад гармоник оборотной частоты по отношению к вкладу гармоник зубцовой частоты (см. табл.) составляет в среднем 25–30 %, что также свидетельствует о различиях в работе каждой из двух режущих кромок фрезы. Причиной этого может быть и резонанс оборотной частоты вращения шпинделя с соответствующими частотами некоторых узлов станка, в частности с частотами возможных совместных колебаний инструмента и заготовки.

Для сравнения проведено измерение вибрации сил при фрезеровании на более низкой скорости вращения $n = 1\,800$ об/мин концевой

фрезы с числом режущих кромок $z = 4$. На рис. 10, а приведен спектр колебаний силы фрезерования в направлении обработки F_x с одиночным пиком на зубцовой частоте 120 Гц. На рис. 10, б представлена орбита колебаний проекций сил фрезерования в координатах F_x, F_y в плоскости обработки за период оборотной частоты с четырьмя завершенными эллиптическими орбитами зубцовых частот. При отсутствии резонансов механообработка каждой из четырех режущих кромок ведется более равномерно.

Новую информацию при исследовании вибрации сил взаимодействия фрез с заготовкой представляют проекции сил в цилиндрической системе координат. Определение тангенциальных F_τ и радиальных F_r составляющих силы фрезерования по проекциям сил F_x и F_y (рис. 11) проводилось по уравнениям:

$$F_\tau = F \cos \varphi; F_r = F \sin \varphi; F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2};$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - (\gamma + \alpha);$$

$$\alpha = \omega t \quad \gamma = \arctg\left(\frac{F_y}{F_x}\right).$$

Изменение тангенциальной и радиальной сил при обработке за период оборотной частоты при попутном фрезеровании представлено на рис. 12 и 13.

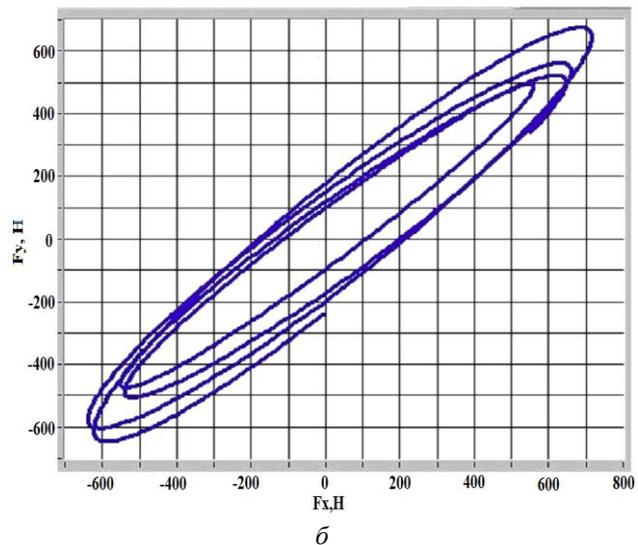
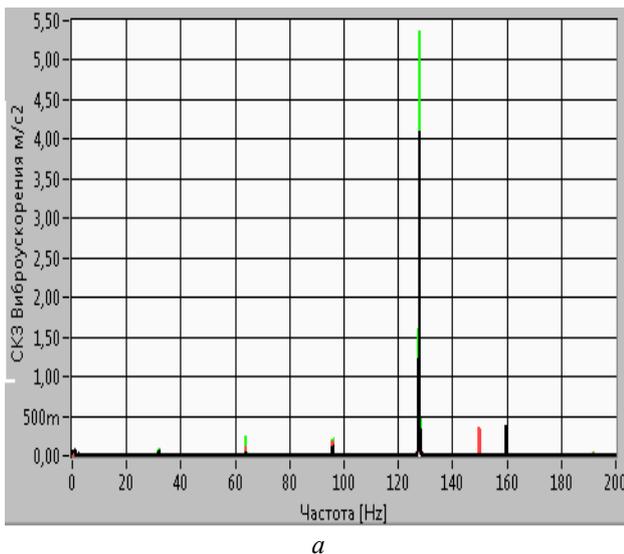


Рис. 10. Спектр колебаний силы фрезерования в направлении обработки F_x (а) и орбита колебаний сил фрезерования концевой фрезой с четырьмя режущими кромками (б)

Fig. 10. Milling force fluctuation spectrum in machining direction F_x (a) and milling force fluctuation orbit with a 4-flute end mill (b)

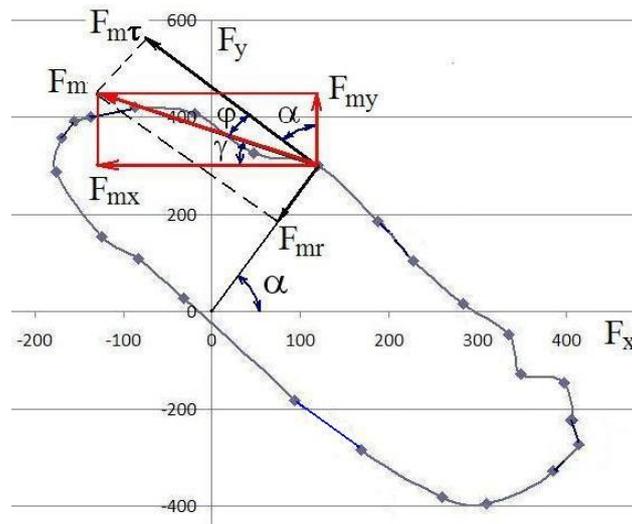


Рис. 11. Проекция силы резания на декартовы и естественные оси координат
 Fig. 11. Cutting Force Projections on Cartesian and Natural Coordinate Axes

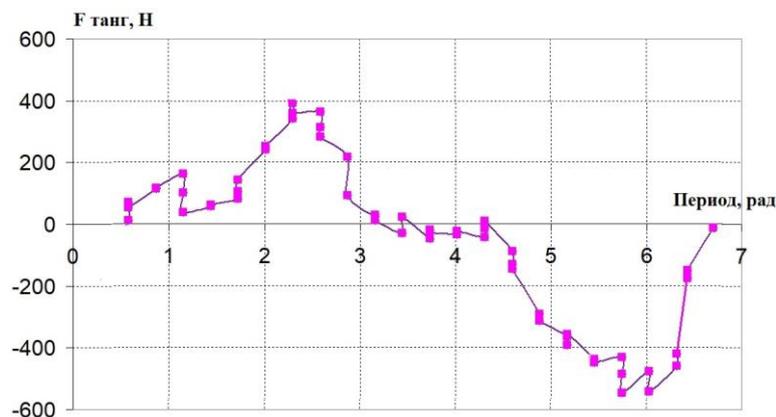


Рис. 12. Изменение тангенциальной силы резания за период оборотной частоты при встречном фрезеровании
 Fig. 12. Change in the tangential milling force over the period of revolution frequency in up-cut milling

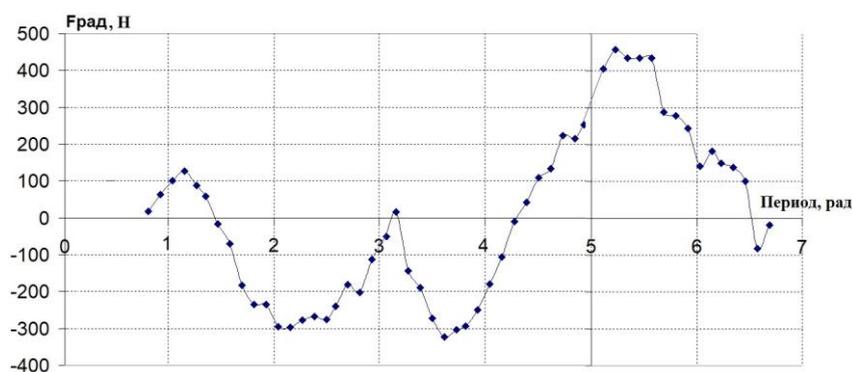


Рис. 13. Изменение тангенциальной силы резания за период оборотной частоты при попутном фрезеровании
 Fig. 13. Change in the tangential milling force over the period of revolution frequency during climb milling

Проведенный анализ тангенциальных и радиальных вибрационных сил при попутном фрезеровании показывает снижение амплитуд этих колебаний по сравнению со встречным

фрезерованием. Графики тангенциальных и радиальных сил за период оборотной частоты, изображенные на рис. 12 и 13 близки к периоду синусоидальной силы с учетом искажений за

счет присутствия значительной по амплитуде второй гармоники зубцовой частоты, что и подтверждается приведенными данными по спектральному составу вибрации сил по координатам X , Y при фрезеровании.

Заключение

Полученные данные в виде осциллограмм и спектров сил резания в декартовых и цилиндрических координатах позволили исследовать силовые взаимодействия инструмента с заготовкой при попутном и встречном фрезеровании. Данные настоящего исследования показывают, что предпочтительное использование попутного фрезерования в то же время приводит к значительному возрастанию поперечной вибрации на оборотной, зубцовой и второй гармониках зубцовой частоты, т. е. на высокочастотных вибрациях, что может привести к резонансу системы «инструмент – приспособление – заготовка». Исследование графиков радиальных и тангенциальных колебаний сил фрезерования иллюстрирует «неидеальный» случай обработки заготовки, когда режущие кромки фрезы загружены неравномерно и работают не на всем участке снятия стружки. Исследования траекторий орбит сил обработки на зубцовых и оборотных частотах дают новую информацию о неравномерной загрузке режущих

кромки фрез, что неизбежно негативно сказывается на качестве фрезерования и ускоренном износе инструмента.

На основе проведенных экспериментальных исследований силовых взаимодействий при фрезеровании были сформулированы следующие выводы:

1. Уровень колебаний составляющих сил резания по координатам X , Y , Z изменяется от 4 до 10 раз в зависимости от режимов фрезерования.

2. На многих режимах режущие кромки фрезы работают с неполной нагрузкой (в 25 % случаях работала только одна режущая кромка фрезы из двух). Это увеличивает шероховатость поверхности детали и способствует преждевременному износу инструмента.

3. Вибрационным признаком оптимального фрезерования является наличие значительной гармоники зубцовой частоты при минимуме остальных гармоник. При этом орбита сил резания за период будет иметь равенство между количеством замкнутых траекторий и числом режущих кромок. Данный признак может использоваться в системах мониторинга и виброзащиты станочного оборудования для обеспечения адаптивного контроля и автоматической коррекции режимов резания.

Список литературы

1. Исследование влияния режимов резания на выходные параметры при точении фрезерованием быстрорежущей стали / Г.В. Матлыгин, А.В. Савилов, А.С. Пятых и др. // *Advanced Engineering Research*. 2022. Т. 22. № 2. С. 99–106.
2. Вопросы конечно-элементного анализа винтов транспедикулярной фиксации / А.С. Пятых, А.А. Дук, С.А. Тимофеев и др. // *Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации) : материалы докладов VI Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Иркутск, 2022*. С. 244–251.
3. Лукьянов А.В., Алейников Д.П., Портной А.Ю. Система защиты обрабатываемых центров от опасных динамических нагрузок на основе анализа параметров вибрации и силы // *Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та*. 2017. Т. 21. № 4 (123). С. 30–38.
4. Пятых А.С., Савилов А.В., Николаев А.Ю. Исследование зажимных патронов для сверления точных отверстий // *Системы. Методы. Технологии*. 2016. № 4 (32). С. 70–74.
5. Алейников Д.П., Лукьянов А.В. Исследование динамики крепления датчиков вибрации шпинделей обрабатываемых центров // *Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та*. 2015. № 2 (97). С. 28–35.
6. Serebrennikova A.G., Savilov A.V. A Study of Effects of the Cutting Tool Geometry on the Output Parameters When Turning VT22 Titanium Alloy // *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021)*. Челябинск, 2022. С. 642–649. DOI 10.1007/978-3-030-85230-6_76.
7. Лукьянов А.В., Алейников Д.П. Исследование пространственной вибрации обрабатываемого центра в режиме фрезерования // *Системы. Методы. Технологии*. 2014. № 1 (21). С. 96–101.
8. Лукьянов А.В., Алейников Д.П., Костин П.Н. Разработка и опытная эксплуатация системы виброударозащиты и диагностики обрабатываемых центров // *Проблемы механики современных машин : сб. ст. VIII Междунар. конф. Улан-Удэ, 2022*. С. 150–155.
9. Пятых А.С., Савилов А.В., Тимофеев С.А. Метод контроля износа режущего инструмента при концевом фрезеровании нержавеющей стали // *Трение и износ*. 2021. Т. 42, № 4. С. 411–417.
10. Timofeev S., Savilov A., Pyatykh A. Studies on the effect of cutter wear on cutting dynamics when turning // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 38. Part 4. P. 1367–1370. DOI 10.1016/j.matpr.2020.08.105.
11. Savilov A., Pyatykh A., Nikitenko A. Axial contact points method for improving end-milling productivity // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 38. Part 4. P. 1505–1507. DOI 10.1016/j.matpr.2020.08.138.

12. Nikitenko A. V., Savilov A. V., Pyatykh A. S. Study of the axial contact points method applied when end-milling titanium alloys // *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. P. 436-444. DOI 10.1007/978-3-030-54817-9_51.
13. Pyatykh A.S., Savilov A.V. A study of vibration measuring devices used in the edge cutting machining // *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021)*. Челябинск, 2022. С. 634–641. DOI 10.1007/978-3-030-85230-6_75.
14. Исследование технологии обработки отверстий малых диаметров в полимерном композиционном материале на робототехническом комплексе / Н.С. Чашин, Ю.Н. Иванов, А.В. Сидорова и др. // *Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та*. 2017. Т. 21. № 6 (125). С. 39–48.
15. Чашин Н.С., Иванов Ю.Н. Обработка отверстий в смешанных пакетах методом орбитального сверления // *Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та*. 2015. № 11 (106). С. 44–49.
16. Неразрушающий контроль / под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 8. М : Машиностроение, 2005. 789 с.
17. Григорьев С.Н., Гурин В.Д., Козочкин М.П. Диагностика автоматизированного производства. М : Машиностроение, 2011. 600 с.
18. Семенов Е.Н., Беломестных А.С., Сидорова А.В. Исследование частотных характеристик работа KUKA KR210 R2700 extra // *Авиационное машиностроение и транспорт Сибири : сб. ст. всерос. молодежн. науч.-практ. конф. Иркутск, 2016*. С. 252–257.
19. Савилов А.В., Пятых А.С. Влияние вибраций на точность и качество поверхности отверстий при сверлении // *Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та*. 2013. № 12 (83). С. 103–111.
20. Савилов А.В., Пятых А.С. Определение коэффициентов сил резания для моделирования процессов механообработки // *Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук*. Т. 17. № 2. 2015. С. 211–216.

References

1. Matlygin G.V., Savilov A.V., Pyatykh A.S., Timofeev S.A. Issledovanie vliyaniya rezhimov rezaniya na vykhodnye parametry pri tochenii frezerovaniem bystrorezhushchei stali [Research of the effect of cutting modes on output parameters under high-speed steel turn-milling]. *Advanced Engineering Research*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 99–106.
2. Pyatykh A.S., Duk A.A., Timofeev S.A., Ushakov V.A. Voprosy konechno-elementnogo analiza vintov transpedikul'yarnoi fiksatsii [Questions of finite element analysis of transpedicular fixation screws]. *Materialy dokladov VI Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Zhiznennyi tsikl konstruktivnykh materialov (ot polucheniya do utilizatsii)»* [Proceedings of the VI All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation «The life cycle of constructional materials (from receipt to disposal)»]. Irkutsk, 2022, pp. 244–251.
3. Luk'yanov A.V., Aleinikov D.P., Portnoi A.Yu. Sistema zashchity obrabatyvayushchikh tsentrov ot opasnykh dinamicheskikh nagruzok na osnove analiza parametrov vibratsii i sily [The system of protection of machining centers from dangerous dynamic loads based on the analysis of vibration and force parameters]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University], 2017, vol. 21, no. 4 (123), pp. 30–38.
4. Pyatykh A.S., Savilov A.V., Nikolaev A.Yu. Issledovanie zazhimnykh patronov dlya sverleniya tochnykh otverstii [Investigation of chucks for drilling precise holes]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2016, no. 4 (32), pp. 70–74.
5. Aleinikov D.P., Luk'yanov A.V. Issledovanie dinamiki krepleniya datchikov vibratsii shpindel' obrabatyvayushchikh tsentrov [Research of fixation dynamics of machining center spindle vibration sensors]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University], 2015, no. 2(97), pp. 28–35.
6. Serebrennikova A.G., Savilov A.V. A Study of Effects of the Cutting Tool Geometry on the Output Parameters When Turning VT22 Titanium Alloy. *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021)*. *ICIE: International Conference on Industrial Engineering*, 2022, pp. 642-649. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_76.
7. Luk'yanov A.V., Aleinikov D.P. Issledovanie prostranstvennoi vibratsii obrabatyvayushchego tsentra v rezhime frezerovaniya [Research of vibration machining center in milling mode]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2014, no. 1 (21), pp. 96–101.
8. Lukyanov A.V., Aleinikov D.P., Kostin P.N. Razrabotka i opytная ekspluatatsiya sistemy vibroudaro-zashchity i diagnostiki obrabatyvayushchikh tsentrov [Development and trial operation of the system of vibration-shock protection and diagnostics of machining centers]. *Sbornik statei VIII mezhdunarodnoi konferentsii «Problemy mekhaniki sovremennykh mashin»* [Proceedings of VIII International Conference «Problems of the mechanics of modern machines»]. Ulan-Ude, 2022, pp. 150–155.
9. Pyatykh A.S., Savilov A.V., Timofeev S.A. Metod kontrolya iznosa rezhushchego instrumenta pri kontsevom frezerovanii nerzhavayushchei stali [Method of tool wear control when stainless steel end milling]. *Trenie i iznos* [Friction and wear], 2021, vol. 42, no. 4, pp. 411–417. <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2021-42-4-411-417>.
10. Timofeev S., Savilov A., Pyatykh A. Studies on the effect of cutter wear on cutting dynamics when turning. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 38, part 4, pp. 1367-1370. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.105>.
11. Savilov A., Pyatykh A., Nikitenko A. Axial contact points method for improving end-milling productivity. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 38, part 4, pp. 1505-1507. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.138>.
12. Nikitenko A. V., Savilov A. V., Pyatykh A. S. Study of the axial contact points method applied when end-milling titanium alloys. *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering* / eds. A. A. Radionov, V. R. Gasiyarov. Cham: Springer, 2020, pp. 436-444. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_51.
13. Pyatykh A.S., Savilov A.V. A study of vibration measuring devices used in the edge cutting machining. *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021)*. *ICIE: International Conference on Industrial Engineering*, 2022, pp. 634-641. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_75.

14. Chashchin N.S., Ivanov Yu.N., Sidorova A.V., Semenov E.N., Sturov A.A. Issledovanie tekhnologii obrabotki otverstii malykh diametrov v polimernom kompozitsionnom materiale na robototekhnicheskom komplekse [Investigation of the technology of processing holes of small diameters in a poly-dimensional composite material on a robotic complex]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2017, vol. 21, no. 6 (125), pp. 39–48.
15. Chashchin N.S., Ivanov Yu.N. [Processing of openings in mixed packages by the method of orbital drilling]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2015, no. 11 (106), pp. 44–49.
16. Nerazrushayushchii kontrol' (v 8 t.) [Non-destructive testing (in 8 vol.)]. Vol. 8. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2005. 789 p.
17. Grigor'ev S.N., Gurin V.D., Kozochkin M.P. Diagnostika avtomatizirovannogo proizvodstva [Diagnosis of computer-aided manufacturing]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2011. 600 p.
18. Semenov E.N., Belomestnykh A.S., Sidorova A.V. Issledovanie chastotnykh kharakteristik robota KUKA KR210 R2700 extra [Research of the frequency characteristics of the robot KUKA KR210 R2700 extra]. *Sbornik statei vserossiiskoi molodezhnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aviamashinostroenie i transport Sibiri»* [Proceedings of the All-Russian Youth Scientific and Practical Conference «Air-transport engineering of Siberia»]. Irkutsk, 2016, pp. 252–257.
19. Savilov A.V., Pyatykh A.S. Vliyanie vibratsii na tochnost' i kachestvo poverkhnosti otverstii pri sverlenii [Influence of vibration on accuracy and quality of hole surface under drilling]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2013, no. 12(83), pp. 103–111.
20. Savilov A.V., Pyatykh A.S. Opredelenie koeffitsientov sil rezaniya dlya modelirovaniya protsessov mekhanoobrabotki [The identification cutting force coefficients for simulation of the machining]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Bulletins of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2015, vol. 17, no. 2, pp. 211–216.

Информация об авторах

Лукьянов Анатолий Валерианович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: loukian@inbox.ru.

Алейников Дмитрий Павлович, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий, Восточно-Сибирский институт МВД России, г. Иркутск; e-mail: dmitriy-aleinikov@mail.ru.

Костин Павел Николаевич, аспирант кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск; e-mail: kostin95pavel@mail.ru.

Information about the authors

Anatolii V. Luk'yanov, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: loukian@inbox.ru.

Dmitrii P. Aleinikov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Information technology, East Siberian Institute of Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, Irkutsk; e-mail: dmitriy-aleinikov@mail.ru.

Pavel N. Kostin, Ph.D. student of Department of Technology and equipment of machine-building industries, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk; e-mail: kostin95pavel@mail.ru.