

**П.Н. Костин<sup>1</sup>, А.В. Лукьянов<sup>1</sup>, Д.П. Алейников<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

## **К ВОПРОСУ НЕОБХОДИМОСТИ КОНТРОЛЯ ДИНАМИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ: СТАНОК-ПРИСПОСОБЛЕНИЕ-ИНСТРУМЕНТ-ЗАГОТОВКА**

**Аннотация.** В статье обосновывается необходимость контроля и повышения динамической стабильности системы станок-приспособление-инструмент-заготовка. Исследование динамических характеристик узлов станка, приспособлений и инструмента по параметрам вибрации является одним из способов достижения высокого качества производимой продукции и увеличения срока службы инструмента, основного и вспомогательного оборудования. Поэтому при проектировании станка, оснастки и инструмента, или при выборе готового технологического оборудования, а также в процессе их эксплуатации необходимо контролировать динамические характеристики.

**Ключевые слова:** динамическая стабильность резания, колебания инструмента и заготовки, виброперемещения, станок-приспособление-инструмент-заготовка.

**P.N. Kostin<sup>1</sup>, A.V. Lukyanov<sup>1</sup>, D.P. Aleynikov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

## **THE MATTER OF THE NECESSITY OF CONTROLLING THE DYNAMICS OF INTERACTION IN THE SYSTEM: MACHINE – ACCESSOR – TOOL – WORK PIECE**

**Abstract.** The article motivates the necessity to control and improve the dynamic stability of the system machine-accessor-tool-workpiece. Investigation of the dynamic characteristics of machine parts, accessors and tool according to vibration parameters is one of the ways to achieve high quality of the manufactured products and to increase the service life of the tool, main and auxiliary machinery. Therefore, it is necessary to control dynamic characteristics when designing a machine, gadgetry and tool, or when selecting ready major equipment, as well as in the process of their operation.

**Keywords:** cutting dynamic stability, tool and work piece oscillations, vibratory displacements, machine – accessor – tool – work piece.

### **Введение**

Динамика технологической системы станок-приспособление-инструмент-заготовка существенным образом влияет на качественные характеристики готового изделия. При любом способе механической обработки возникают колебания, являющиеся негативным фактором, влияющим на выходное качество детали, а при отсутствии должного контроля в процессе эксплуатации вибрация может превысить допустимый уровень, что может привести к снижению производственных и технических характеристик всех элементов системы, к быстрому износу оборудования и инструмента, повреждению узлов станка и инструмента, нанесению вреда рабочему персоналу. Также пренебрежение динамическими факторами в технологической системе часто способствуют неверному назначению режимов резания [1, 2], что в свою очередь приводит к дополнительному усилению уровня вибраций и даже может приводить к разрушительным и дорогостоящим последствиям.

Поэтому для эффективной и безопасной эксплуатации оборудования необходимо постоянное измерение и анализ вибрации во всех узлах станка, оснастке и инструменте. В случае отсутствия контроля динамических характеристик при проектировании или выборе станочного оборудования, оснастки и инструмента в принципе нельзя говорить о высоком качестве выходной продукции и о длительном периоде его эксплуатации. Учет параметров вибрации является одним из способов достижения высокого качества производимой продукции и увеличения периода стойкости станочного оборудования, оснастки и инструмента. Поэтому существует необходимость повышения динамической стабильности данной технологической системы. Целью проводимых авторами исследований является

повышение динамической стабильности системы станок-приспособление-инструмент-заготовка при фрезеровании.

### **Жесткость и вибрация системы станок-приспособление-инструмент-заготовка**

При механической обработке резанием технологическую систему станка предлагается рассматривать как замкнутую динамическую систему, включающую в себя упругую систему станок-приспособление-инструмент-заготовка (СПИЗ) и рабочие процессы, протекающие в подвижных соединениях (резание, трение, и т.д.). Положение о замкнутости динамической системы СПИЗ было сформулировано В.А. Кудиновым [3]. По этому положению при анализе собственной устойчивости и характеристик элементов динамической системы предлагается рассматривать каждый элемент системы отдельно, так и всю систему как единое целое.

Суммарная податливость системы  $\delta$  состоящей из  $N$ -го количества элементов определяется как сумма податливостей всех  $i$ -ых элементов, входящих в систему:

$$\delta = \sum_{i=1}^N \delta_i, \quad (1)$$

Жесткость  $k$  есть величина обратная податливости:

$$\delta = 1/k, \quad (2)$$

При малой жесткости отдельного элемента системы падает суммарная жесткость всей системы и возрастает вибрация. Это объяснимо тем, что все звенья технологической системы под воздействием сил и моментов деформируются, что оказывает влияние на их движение, а при соединении отдельных звеньев в систему, её можно рассматривать как упругое последовательное соединений элементов с различной жёсткостью, тогда справедливо выражение:

$$\frac{1}{k} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{k_i}, \quad (3)$$

где  $N$  – количество упругих  $i$ -ых элементов системы;  $k$  – суммарная жесткость системы (Н/м).

При этом, частота собственных колебаний  $f$  и жесткость  $k$  находятся в прямой зависимости друг от друга, следовательно частоту собственных колебаний для системы, состоящей из  $N$  элементов можно определить как:

$$1/f = \sum_{i=1}^N 1/f_i, \quad f = \prod_{i=1}^N f_i / \sum_{i=1}^N f_i. \quad (4)$$

Авторами в работе [4] подтверждена гипотеза о том, что элементы системы можно представлять, как последовательное соединение упругих элементов.

Механические способы обработки сопровождаются изменением геометрической формы и уменьшением массы заготовки в процессе резания [5], что приводит к изменению собственных частот колебаний, и повышает вероятность возникновения резонансов в технологической системе. При этом необходимо учитывать частотные характеристики в процессе её обработки и между технологическими переходами, т.к., изменение частоты собственных колебаний между переходами, особенно при значительном удалении материала, или получении тонкостенной геометрии существенно снижает жесткость заготовки и может способствовать попаданию в резонансный диапазон всей системы, как это было показано авторами в работе [6].

Риск появления вибраций также увеличивается с возрастанием скорости резания, так, при высокопроизводительной обработке недостаточная жесткость одного из элементов СПИЗ в сочетании с высокими скоростями может привести как к бракованной продукции, так и к выходу дорогостоящего инструмента и оборудования из строя.

## Связь между вибрацией и параметрами качества

Возникающие при работе станка колебания существенно влияют на точность формы и шероховатость. Точность поверхностей деталей, обработанных на металлорежущих станках, в значительной степени зависит от возможности ограничения амплитуды колебаний [7,8,9]. Таким образом, обеспечение необходимых условий обработки на металлорежущих станках обуславливается решением проблемы борьбы с вибрациями станков и, следовательно, существенным уменьшением погрешностей формы обработанных поверхностей [10].

Процесс фрезерования неизбежно сопровождается прерывистым силовым воздействием фрезы на заготовку [11]. Подобное периодическое силовое воздействие приводит к вынужденным колебаниям в системе СПИЗ и оказывает разрушительный эффект режущим кромкам фрезы и негативно сказывается на качественных характеристиках обрабатываемого изделия.

В настоящий момент имеется большое количество работ, посвященных динамике различных технологических систем резания, но очень мало внимания уделено взаимосвязи динамики фрезерования и микрогеометрии обработанных поверхностей. Выявление и понимание такой взаимосвязи дало бы дополнительные возможности по технологической диагностике и получению стабильного качества изделия. Задача по выявлению подобной взаимосвязи предполагает одновременный анализ виброграмм и профилограмм. Но данная задача часто усложнена тем, что большая часть деталей подвергается обработке в несколько технологических переходов, а это в свою очередь приводит к возникновению колебаний, зависящих от предыдущих технологических операций, т.е., имеет место «геометрический след» или «технологическая наследственность» [12].

При этом в работе [13] отмечено, что колебания при лезвийной обработке могут иметь положительное влияние на стойкость инструмента и качественные характеристики детали при малых амплитудах, и наоборот отрицательное при высокой амплитуде. Это объясняется тем, что с увеличением амплитуды колебаний высотные параметры шероховатости и волнистости обработанной поверхности возрастают.

Проведенные авторами исследования [6,14,15] показали влияние изменяющейся в процессе изготовления детали собственной частоты заготовки на резонансные свойства системы СПИЗ. В процессе механической обработки, в зависимости от формы готовой детали и ее физико-механических характеристик, при удалении лишнего металла собственные частоты заготовки при различных формах колебаний изменяются. Так на рисунке 1 показаны результаты определения собственной частоты колебаний по первой изгибной форме колебаний и максимально вероятные деформации детали для технологических переходов на первом и втором установе детали типа «крышка-кронштейн».

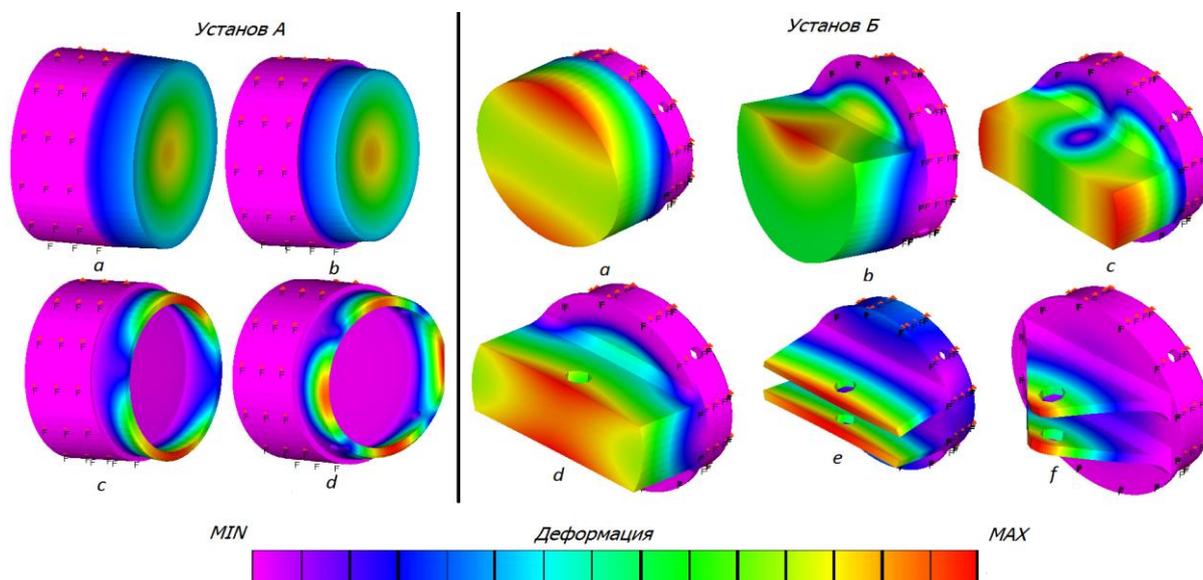


Рис. 1. Первые формы колебаний заготовки в процессе ее изготовления

Технологический процесс изготовления данной детали предполагает два технологических установа, в результате которого необходимо сменить положение заготовки.

Собственные частоты колебаний  $f$  и возможные виброперемещения  $s$  равны: Для устава «А»: а) перед 1ым ТП,  $f=12650$  Гц,  $s=54,68$  мкм; б) после 1-го ТП,  $f=12640$  Гц,  $s=57,89$  мкм; в) после 2-го ТП,  $f=12337$  Гц,  $s=337,1$  мкм; д) после 3-го ТП,  $f=12100$  Гц,  $s=328,1$  мкм; Для устава «Б»: а) перед 4ым ТП,  $f=11127$  Гц,  $s=69,3$  мкм; б) после 4-го ТП,  $f=6441$  Гц,  $s=91$  мкм; в) после 5-го ТП,  $f=5181$  Гц,  $s=85$  мкм; д) после 6-го ТП,  $f=5224$  Гц,  $s=107$  мкм; е) после 7-го ТП,  $f=1574$  Гц,  $s=201$  мкм; ф) после 8-го ТП,  $f=2990$  Гц,  $s=448$  мкм;

В результате переустановки детали наблюдается незначительное снижение жесткости системы «заготовка - приспособление» ещё до удаления материала, что указывает на зависимость жесткости от способа закрепления заготовки.

При определенных параметрах режимов механической обработки из-за резонансов в системе СПИЗ, в спектре сил фрезерования возможно появление дополнительных гармонических составляющих, указывающих на неравномерное взаимодействие режущих кромок. Эти периодические силовые импульсные взаимодействия только приблизительно можно представить в виде моногармонических колебаний синусоидальной формы. Как показали проведенные авторами спектральные исследования [6], колебания сил обработки являются суммой гармоник оборотной и зубцовых частот. Более высокочастотные гармоники зубцовых частот могут войти в резонанс с собственными частотами детали. Это особенно характерно на конечных этапах технологического процесса изготовления, когда удален значительный объем материала заготовки.

### **Заключение**

Для оптимального выбора режимов резания необходимо рассматривать жесткость всех элементов СПИЗ как отдельных элементов, так и как целой системы, изменяющейся в процессе обработки детали. Жесткость оказывает существенное влияние на показатели качества обрабатываемой поверхности, износ инструмента и срок службы основного и вспомогательного технологического оборудования. Также в случае, если система СПИЗ испытывает вибрации, то появляется шум, который утомляет обслуживающий персонал и ухудшает условия их труда.

Повышение динамической стабильности технологической системы СПИЗ позволит получать готовые изделия стабильно высокого качества, и повысят эксплуатационный ресурс основного и вспомогательного технологического оборудования, оснастки и инструмента. Выданные рекомендации по повышению динамической стабильности процесса фрезерования могут упростить задачу технологу по назначению режимов фрезерования и выбору оборудования.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Савилов А.В., Пятых А.С. Влияние вибраций на точность и качество поверхности отверстий при сверлении. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 12. С. 103–110
2. Савилов А.В., Пятых А.С., Тимофеев С.А. Оптимизация процессов механообработки на основе модального и динамометрического анализа. Наука и технологии в промышленности. 2013. № 1-2. С. 42–46
3. Динамика станков. В.А. Кудинов. Издательство «Машиностроение» 1967.
4. Костин П.Н., Лукьянов А.В. Коррекция частоты вращения шпинделя при фрезеровании по данным численного моделирования системы: приспособление-инструмент-заготовка. Вестник иркутского государственного технического университета . 2019. №1. с. 54-62.
5. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design. New York: Cambridge University Press, 2012. 366 p.

6. Костин П.Н., Лукьянов А.В., Алейников Д.П. Коррекция режимов резания по данным численного моделирования динамики системы инструмент-заготовка с учетом резонансов. Вестник иркутского государственного технического университета . 2020. №5. с. 993-1006.
7. Игнатъев С.А., Игнатъев А.А., Иващенко В.А. Автоматизированные системы мониторинга технического состояния технологического оборудования. Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 8. С. 43–47.
8. Sastry S., Kapoor S.G., Devor R.E. Floquet theory based approach for stability analysis of the variable speed face-milling process. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2002. Vol. 124. Issue 1. P. 10–17. <https://doi.org/10.1115/1.1418695>
9. Драчев О.И. Технология вибрационной обработки и вибрационного точения маложестких деталей. Серия: Управление качеством технологических процессов в машиностроении. Иркутск: Изд-во «Объединение научных инженерных коммерческих структур», 2015. 260 с Гимадеев М.Р., Давыдов В.М. Обеспечение качества поверхности при механообработке сложнопрофильных деталей. Технология машиностроения. 2018. № 11. С. 9–16.
10. В.С. Сальников, О.А. Ерзин, Г.В. Шадский, В.В Жмурин Динамические характеристики многоцелевых станков. Известия ТулГУ 2013.
11. Алейников Д.П., Лукьянов А.В. Моделирование сил резания и определение вибродиагностических признаков дефектов концевых фрез. Системы. Методы. Технологии. 2017. № 1. С. 39–47. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2017-1-39-47>
12. Пашков А.Е., Воинов А.В., Вяткин А.С., Тараканова Ю.С. О влиянии технологической наследственности при черновом фрезеровании крупногабаритных деталей. Вестник иркутского государственного технического университета . 2011. №10. с. 52-58.
13. Жарков, И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом /И.Г. Жарков.– Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1986. – 186 с.
14. Костин П.Н., Лукьянов А.В. Коррекция частоты вращения шпинделя при фрезеровании по данным численного моделирования системы: приспособление-инструмент-заготовка. Вестник иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 144. № 1 (144). С. 54–62.
15. Костин П.Н., Лукьянов А.В., Алейников Д.П. Определение частот колебаний заготовки с учетом специфики ее крепления. Молодежный вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 8. № 3. С. 23–29.

## REFERENCES

1. Savilov AV, Pyatyh AS. Vibration effect on accuracy and quality of hole surface under drilling. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2013;12:103–110. (In Russ.)
2. Savilov AV, Pjatyh AS, Timofeev SA. Machining processes optimization based on modal and dynamometric analysis. Nauka i tehnologii v promyshlennosti. 2013;1-2:42–46. (In Russ.)
3. Dynamics of machine tools. V.A. Kudinov. Mashinostroenie Publishing House 1967.
4. Kostin P.N., Lukyanov 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. No. 1. with. 54-62. (In Russ.)
5. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design. New York: Cambridge University Press, 2012. 366 p.
6. Kostin P.N., Lukyanov A.V., Aleinikov 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. No. 5. with. 993-1006.
7. Ignatjev SA, Ignatjev AA, Ivaschenko VA. Automated systems of monitoring of the technical condition of technological equipment. Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, automation, control. 2009;8:43–47. (In Russ.)

8. Sastry S., Kapoor S.G., Devor R.E. Floquet theory based approach for stability analysis of the variable speed face-milling process. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2002. Vol. 124. Issue 1. P. 10–17. <https://doi.org/10.1115/1.1418695>
9. Drachev OI. Technology of vibration processing and vibration turning of low-rigid parts. Series: Quality management of technological processes in mechanical engineering. Irbit: Ob'edinenie nauchnyh inzhenernyh kommercheskih struktur; 2015, 260 p. (In Russ.)
10. V.S. Salnikov, O. A. Erzin, G.V. Shadskiy, V.V. Zhmurin Dynamic characteristics of multi-purpose machines. Bulletin of TulSU 2013. (In Russ.)
11. Aleynikov DP, Lukyanov AV. Cutting forces modeling and vibration diagnostics of signs of end mills defects. Sistemy. Metody. Tekhnologii. Systems. Methods. Technologies. 2017;33:39–47. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2017-1-39-47> (In Russ.)
12. Pashkov A.E., Voinov A.V., Vyatkin A.S., Tarakanova Yu.S. On the influence of technological heredity in rough milling of large parts. Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2011. No. 10. P. 52-58. (In Russ.)
13. Zharkov, I.G. Vibration during processing with a blade tool / I.G. Zharkov. - L.: Mechanical Engineering, Leningrad. separate, 1986. -- 186 p.
14. Kostin P.N., Lukyanov 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. Vol. 144. No. 1 (144). P. 54–62.
15. Kostin P.N., Lukyanov A.V., Aleinikov D.P. Determination of the vibration frequency, taking into account the specifics of its attachment. Youth Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2018. Vol. 8. No. 3, pp. 23–29.

#### **Информация об авторах**

*Костин Павел Николаевич* – аспирант кафедры Технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: [kostin95pavel@mail.ru](mailto:kostin95pavel@mail.ru) тел. 89248208683

*Лукьянов Анатолий Валерианович* – доктор технических наук, профессор кафедры Технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: [loukian@inbox.ru](mailto:loukian@inbox.ru)

*Алейников Дмитрий Павлович* – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: [dmitriy-aleinikov@mail.ru](mailto:dmitriy-aleinikov@mail.ru)

#### **Authors**

*Pavel Nikolayevich Kostin* – postgraduate student of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: [kostin95pavel@mail.ru](mailto:kostin95pavel@mail.ru) tel. number. 89248208683

*Anatoliy Valerianovich Lukyanov* – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: [loukian@inbox.ru](mailto:loukian@inbox.ru)

*Dmitriy Pavlovich Aleynikov* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: [dmitriy-aleinikov@mail.ru](mailto:dmitriy-aleinikov@mail.ru)