

УДК 629.113.001

## К вопросу о необходимости проведения частотного анализа системы «станок – приспособление – инструмент – заготовка» при высокопроизводительном фрезеровании

© Р.В. Кононенко, П.Н. Костин

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

В статье приведено описание и дан анализ основных подходов при назначении оптимальных режимов фрезерования с точки зрения достижения максимальной производительности и недопущения возникновения вибраций в технологической системе «станок – приспособление – инструмент – заготовка». Показано, что увеличение производительности сдерживается возможностями данной технологической системы, а также силами резания для конкретной фрезы и обрабатываемого материала. Предложен комплексный подход по назначению оптимальных режимов фрезерования, в том числе с применением современных систем автоматизированного расчета.

*Ключевые слова:* высокопроизводительное и высокоскоростное фрезерование, производительность фрезерования, стабильность фрезерования, частотный анализ

## On the Need for Frequency Analysis System of “Machine – Adaptation – Tool – Work Piece” in High-Performance Milling

© Roman V. Kononenko, Pavel N. Kostin

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

The article describes and analyzes the basic approaches for the optimal milling regimes in terms of achieving maximum performance and preventing vibrations in the technological system of machine-adaptation-tool-work piece. The article shows that the increase in productivity is restrained by the capabilities of this technological system, as well as by the cutting forces for a specific cutter and the processed material. The article proposes an integrated approach for the appointment of optimal milling modes, including using modern automated calculation systems.

*Keywords:* high-performance and high-speed milling, milling performance, milling stability, frequency response analysis

При выборе режимов высокоскоростного фрезерования технолог руководствуется типовыми рекомендациями из каталогов производителя инструмента, которые зачастую не обеспечивают высокое качество обработки вследствие возникновения вибраций.

При фрезеровании жестких крупногабаритных заготовок основной причиной возникновения вибраций являются колебания шпиндельной группы станка, образованной непосредственно шпинделем и системой закрепления инструмента.

При механической обработке маложестких деталей, таких как, например, панели, или при использовании инструмента с большим вылетом, высока вероятность появления дополнительных источников вибраций, вызванных входением в резонанс заготовки и/или инструмента в процессе обработки с элементами технологической системы «станок – приспособление – инструмент – заготовка» (далее – системы СПИЗ), что подтверждают работы [1, 2].

Возникающие при этом вибрации обладают амплитудами, сопоставимыми с толщиной стружки, что приводит к снижению качества обработанной поверхности, снижению периода стойкости инструмента и технологического оборудования.

Для снижения негативного влияния вибрации оператору станка или технологу приходится производить коррекцию рекомендованных производителем инструмента режимов резания в сторону уменьшения производительности.

Уменьшение глубины и/или ширины фрезерования, и/или подачи снижает производительность и не позволяет задействовать полную мощность привода станка, делая готовое

изделие не только более трудоемким, но и дорогим, что существенно подрывает конкурентоспособность производителя изделия.

Необоснованные занижения технологически возможных режимов резания, вызванные нестабильностями процесса резания в системе СПИЗ, подталкивают к необходимости совершенствования методического обеспечения процесса высокоскоростного и высокопроизводительного фрезерования.

Особенно остро проблема возникновения вибраций стоит при высокоскоростной высокопроизводительной механической обработке, когда частоты шпинделя составляют 20000 об./мин и более, а глубина, ширина и подача устанавливаются максимально возможными. Вопросам природы вибраций при высокопроизводительной механообработке посвящены работы [3, 4, 5].

Производительность фрезерования  $Q$  характеризуется объемом удаляемого материала в единицу времени и зависит от режимов резания:

$$Q = a_p \cdot a_e \cdot f_z \cdot z \cdot n / 1000, \quad (1)$$

где  $a_p$  – глубина фрезерования;  $a_e$  – ширина фрезерования;  $f_z$  – подача на зуб;  $z$  – число зубьев фрезы;  $n$  – частота вращения шпинделя.

Как видно из выражения (1), для обеспечения максимальной производительности необходимо увеличивать все компоненты, входящие в данное равенство. Но при увеличении подачи, глубины и ширины фрезерования происходит увеличение сил взаимодействия технологической системы «инструмент – заготовка». Повышение числа зубьев приводит к трудностям удаления стружки. Увеличение числа зубьев и частоты вращения шпинделя также ограничено частотным диапазоном взаимодействующих элементов технологической системы СПИЗ. Под частотным диапазоном при этом понимается область допустимых нерезонансных частот как отдельно взятых компонентов системы СПИЗ, так и всей системы в целом.

Произведение частоты вращения шпинделя и числа зубьев дает зубцовую частоту, которая должна быть максимально удалена от потенциального возникновения резонанса, поэтому необходимо определить собственную частоту колебаний всей взаимодействующей системы СПИЗ.

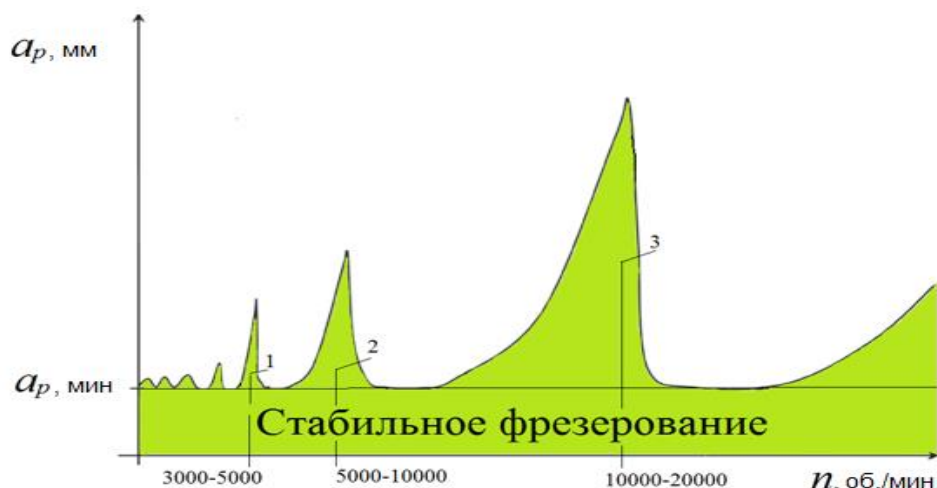
Для того чтобы не попасть в область резонансных частот, назначается рекомендуемая зубцовая частота вращения шпинделя с учетом того, что она может составлять до 50 % от результирующей частоты собственных колебаний взаимодействующей технологической системы СПИЗ [6]:

$$n_{opt} \cdot z = 0.5 \cdot f_0 \cdot 60, \quad (2)$$

где  $f_0$  – резонансная частота системы СПИЗ;  $n_{opt}$  – оптимальная частота вращения шпинделя.

Также существует подход, широко используемый при неизменных ширине фрезерования и подаче на зуб, когда силы взаимодействия элементов СПИЗ определяются в большей мере глубиной фрезерования. Данный метод предлагает рассматривать процесс фрезерования в осях технологических параметров «частота вращения шпинделя – глубина фрезерования», в которых также можно отследить зоны стабильного и вибрационного резания. Примерная форма кривой, дающая сведения о стабильности процесса фрезерования в зависимости от частоты вращения шпинделя и глубины фрезерования, подтверждена в работах [3, 5, 7] и приведена на рисунке.

Как видно на рисунке, существуют зоны стабильного фрезерования (зоны 1, 2, 3), при которых можно существенно увеличивать глубину фрезерования. Область зоны стабильности растет с увеличением частоты вращения шпинделя не во всем спектре частот вращения, а только при определенных значениях, зависящих по оси абсцисс в основном от частотных характеристик всей технологической системы СПИЗ. Данные зоны стабильности определяются в ходе проведения натуральных экспериментов или в процессе построения математической модели [8]. Причем изменение одной из составляющей системы СПИЗ приводит к смещению областей стабильности, что также происходит и при использовании метода назначения оптимальной частоты вращения, описанного выражением (2).



**Стабильность фрезерования в плоскости  
«частоты вращения шпинделя – глубина фрезерования»**

Таким образом, рост производительности при высокоскоростном фрезеровании ограничен возникающими вибрациями в технологической системе СПИЗ. Оптимальные технологические параметры, обеспечивающие высокую производительность при минимальном уровне вибраций в системе, необходимо назначать по результатам оценки сил резания, измерения и анализа вибрационных и динамических характеристик системы и всех элементов, образующих ее, учитывая при этом особенности технологического процесса изготовления детали. Поэтому авторы предлагают определять оптимальные режимы высокопроизводительного, высокоскоростного фрезерования на основе комплексного анализа динамических характеристик всех элементов, образующих систему СПИЗ, получаемых как в ходе натурального эксперимента, так и в ходе конечно-элементного моделирования с применением современных систем инженерного анализа (CAE-систем). Применение подобного подхода отражено в работах [2–4, 7, 9].

**Библиографический список**

1. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 359 с.
2. Костин П.Н., Лукьянов А.В., Алейников Д.П. Определение частот колебаний заготовки с учетом специфики ее крепления // Молодежный вестник ИрГТУ. 2018. Т. 8. № 3. С. 23–28 [Электронный ресурс]. URL: <http://mvestnik.istu.irk.ru/journals/2018/03/articles/05> (10.05.2019).
3. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design. New York: Cambridge University Press, 2012. 366 p.
4. Савилов А.В., Пятых А.С., Тимофеев С.А. Современные методы оптимизации высокопроизводительного фрезерования // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6-2. С. 476–479.
5. Лукьянов А.В., Алейников Д.П. Исследование колебаний сил взаимодействия фрезы с заготовкой при повышении скорости вращения шпинделя // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 4 (56). С. 70–82.
6. 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.
7. Болсуновский С.А., Вермель В.Д., Губанов Г.А., Качарава И.Н., Леонтьев А.Е. Расчетно-экспериментальная оценка рациональных технологических параметров высокопроизводительной фрезерной обработки в составе автоматизированной системы технологической подготовки производства аэродинамических моделей самолетов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4 (2). С. 374–379.
8. Петрухин В.В., Петрухин С.В. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации. М.: Инфра-Инженерия, 2010. 176 с.
9. Пятых А.С., Савилов А.В. Определение коэффициентов сил резания для моделирования процессов механообработки // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17. № 2. С. 211–216.

**Кононенко Роман Владимирович,**

доцент кафедры радиоэлектроники и телекоммуникационных систем,  
Институт высоких технологий,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
e-mail: istu\_politeh@mail.ru

**Roman V. Kononenko,**

Associate Professor of Radio Electronics and Telecommunication Systems Department,  
Institute of High Technologies,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,  
e-mail: istu\_politeh@mail.ru

**Костин Павел Николаевич,**

магистрант,  
Институт авиамашиностроения и транспорта,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
e-mail: kostin95pavel@mail.ru

**Pavel N. Kostin,**

Undergraduate,  
Institute of Aircraft and Machine Building and Transport,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,  
e-mail: kostin95pavel@mail.ru