



## Оценка эффективности подавления автоколебаний при резании по изменению объёма их энергии

В.М. Свинин<sup>1✉</sup>, В.А. Ушаков<sup>2</sup>, А.В. Савилов<sup>3</sup>, А.С. Пятых<sup>4</sup>, А.А. Иринчев<sup>5</sup>

<sup>1-5</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

**Резюме.** Цель – создание инструмента исследователя для оценки и выбора мероприятий по подавлению нежелательных автоколебаний при резании. В качестве количественного критерия эффективности подавления автоколебаний использован объем их внутренней энергии, создаваемой работой радиальной составляющей силы резания. Было принято допущение, что данная работа пропорциональна разности площадей участков срезаемого слоя металла при выходе инструмента из заготовки и врезании в каждом колебании. В качестве объекта исследований был использован маложесткий вал диаметром 48 мм, закрепленный консольно с вылетом 150 мм. Для оценки изменения объема энергии автоколебаний был использован программный продукт на языке SciLab. Обработку вала проводили проходным резцом при частоте вращения шпинделя 208 об/мин с подачей 0,122 мм/об и глубине резания 0,8 мм. Частоту модуляции скорости резания за оборот заготовки приняли равной 0,5. Изменение разности площадей участков срезаемого слоя металла при выходе инструмента из заготовки и врезании рассчитывали последовательно при варьировании глубины модуляции скорости резания в диапазоне от 0 до 30% с интервалом 1%. По результатам расчета получен график изменения относительной разности площадей участков срезаемого слоя (пропорциональной внутренней энергии автоколебаний), аналогичный графику косинусоиды с убывающим размахом. Установлено, что с повышением глубины модуляции скорости резания объем внутренней энергии автоколебаний резко снижается, периодически пульсируя около нулевых значений. Показано, что условия подавления автоколебаний соответствуют локальные минимумы графика. Для практического использования выбран четвертый локальный минимум, соответствующий глубине модуляции скорости резания, равной 13,5%. Показано, что модуляция скорости резания на данной глубине обеспечила по сравнению с постоянной скоростью резания снижение размаха колебаний более 10 раз, а амплитуды автоколебаний – более 12 раз. Полученные результаты доказывают эффективность предложенного способа оценки изменения объема энергии автоколебаний.

**Ключевые слова:** автоколебания при резании, объем внутренней энергии, разность площадей участков срезаемого слоя, модуляция скорости резания, амплитуда автоколебаний

**Финансирование.** Представленная в данной статье работа реализуется в рамках стратегического проекта ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» i.DIT – Байкальский центр цифровых производственных технологий (Программа «Приоритет 2030»).

**Для цитирования:** Свинин В.М., Ушаков В.А., Савилов А.В., Пятых А.С., Иринчев А.А. Оценка эффективности подавления автоколебаний при резании по изменению объёма их энергии // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 4. С. 488–503. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-488-503>. EDN: KNPZMP.

### MECHANICAL ENGINEERING

#### Original article

## Suppression efficiency of self-excited vibrations in machining evaluated by changes in their energy

Valery M. Svinin<sup>1✉</sup>, Vladislav A. Ushakov<sup>2</sup>, Andrey V. Savilov<sup>3</sup>,  
Aleksey S. Pyatykh<sup>4</sup>, Andrey A. Irincheev<sup>5</sup>

<sup>1-5</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract.** The aim was to develop an approach for evaluation and suppression of undesirable self-excited vibrations during the machining process. The suppression efficiency of self-excited vibrations was evaluated by the amount of their internal energy created by the radial cutting force. This force was assumed to be proportional to the difference in the area of the cut metal layer at the tool exit from the workpiece and penetration in each vibration. The research object was a low-rigidity shaft with a diameter of 48 mm, cantilevered with an outreach of 150 mm.

Changes in the energy of self-excited vibrations were evaluated using a software package in the SciLab language. The shaft was machined with a cutting tool at a spindle speed of 208 rpm with a feed of 0.122 mm/rev and a cutting depth of 0.8 mm. The modulation frequency of the cutting speed per workpiece revolution was assumed to be 0.5. The difference in the area of the cut metal layer at the tool exit from the workpiece and penetration was calculated sequentially when varying the depth of cutting speed modulation in the range from 0 to 30% with an interval of 1%. The results obtained were used to draw a plot of changes in the relative difference of the cut layer areas (proportional to the internal energy of self-excited vibrations), similar to a cosine curve with a decreasing magnitude. An increase in the depth of cutting speed modulation was established to sharply reduce the internal energy of self-excited vibrations, periodically pulsing around zero values. The local minima of the plot corresponded to the condition of suppression of self-excited vibrations. The fourth local minimum corresponding to the depth of cutting speed modulation equal to 13.5% was selected as a parameter for practical use. At this depth, cutting speed modulation ensured a more than 10-fold decrease in the vibration range and a 12-fold decrease in the vibration amplitude, in comparison with similar parameters at the constant cutting speed. The results obtained confirm the efficiency of the proposed method for evaluating changes in the energy of self-excited vibrations during the machining process.

**Keywords:** self-oscillation under cutting, volume of internal energy, difference in areas of the cut layer sections, cutting speed modulation, self-oscillation amplitude

**Funding.** The work presented in this article is implemented within the framework of the strategic project i.DIT – Baikal Center for Digital Production Technologies (Priority 2030 Program) of the Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Irkutsk National Research Technical University».

**For citation:** Svinin V.M., Ushakov V.A., Savilov A.V., Pyatykh A.S., Irincheev A.A. Suppression efficiency of self-excited vibrations in machining evaluated by changes in their energy. *iPolytech Journal*. 2024;28(4):488-503. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-488-503>. EDN: KNPZMP.

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях недостаточной жесткости отдельных элементов технологической системы (ТС) механической обработки заготовок резанием или большим силовом нагружении могут возбуждаться автоколебания, резко снижающие точность и качество обработанной поверхности, стойкость инструмента и долговечность оборудования, производительность и экономичность обработки, санитарно-гигиенические условия труда. Поэтому разработка мероприятий по подавлению автоколебаний остается приоритетным направлением развития машиностроения со середины прошлого века в связи со стремлением максимально возможного облегчения массы (и, соответственно, жесткости) деталей проектируемых машин и применения по разным причинам для их изготовления труднообрабатываемых материалов [1]. Способы и устройства для подавления автоколебаний в металлорежущих станках весьма разнообразны по принципу действия, конструктивному исполнению, материальным затратам и эффективности [2]. Их выбор в каждом конкретном случае, как правило, не однозначен и часто сопряжен со значительными временными и финансовыми затратами на реализацию. Выбор мероприятий существенно облегчается при использовании количественного показателя их эффективности. В качестве такого показателя предлагается использовать величину относительного изменения объема энергии, идущей на под-

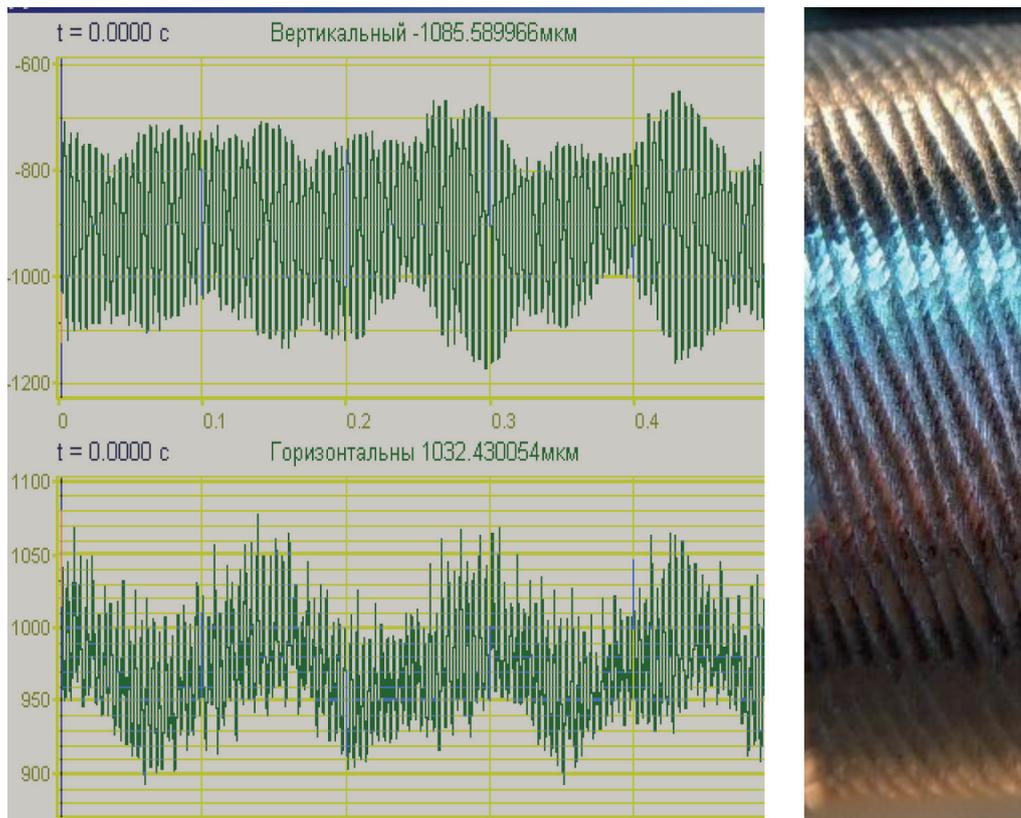
держание и развитие автоколебаний. Целью представленной статьи является создание удобного и надежного инструмента исследователя для оценки и выбора мероприятий по подавлению автоколебаний ТС.

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ПОДАВЛЕНИЯ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ АВТОКОЛЕБАНИЙ

Среди первичных причин возбуждения автоколебаний наибольшее признание получили координатная связь упругих деформаций ТС с несколькими степенями свободы и процесса резания, приводящая к замкнутой траектории перемещения режущего лезвия в виде эллипса [3], и запаздывание силы резания относительно изменения толщины срезаемого слоя [4]. Однако интенсивность вторичного возбуждения регенерацией следа на порядок выше и превышает интенсивность первичного возбуждения [5]. Пример регенеративного возбуждения автоколебаний при точении маложесткого вала приведен в работе [6]. На рис. 1 показаны виброграммы вертикальных и горизонтальных колебаний заготовки, измеренные при точении вала, и обработанная поверхность с ярко выраженным винтообразным узором. Полученный эффект связан с опережением по фазе текущих колебаний относительно колебаний вибрационного следа (рис. 2). Основные параметры автоколебаний (амплитуда, частота и фаза) определяются, с одной стороны, со-

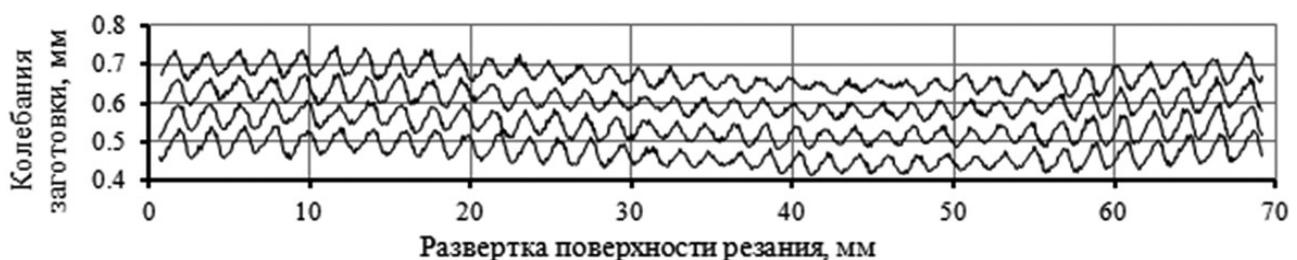
отношением колебательных свойств ТС (массы, жесткости и демпфирования) и силового возбуждения процесса резания, а с другой – стесненностью процесса их регенерации. Если на поверхности резания размещается целое число волн автоколебаний, то регенерация является свободной, и фаза принимает значение  $+90^\circ$  ( $+\pi/2$ ), т.е. автоколебания опережают след на половину волны. Такое значение фазы устанавливается вследствие минимизации ТС своих энергетических затрат на совершение колебательного движе-

ния [7]. При скоростях резания, когда не выполняется условие кратности длины волны автоколебаний длине поверхности резания, регенерация становится стесненной. При этом ТС вынуждена изменять длину волны автоколебаний путем растягивания или сжатия, чтобы разместить их на поверхности резания без остатка. Это проявляется в периодическом изменении частоты и амплитуды автоколебаний, что иллюстрирует известная «лепестковая» диаграмма динамической устойчивости ТС, предложенная Мерриттом.



**Рис. 1.** Виброграммы вертикальных и горизонтальных колебаний заготовки и вид обработанной поверхности:  $t = 0,25$  мм;  $S_o = 0,095$  мм/об;  $n = 400$  об/мин [6]

**Fig. 1.** Vibrograms of workpiece vertical and horizontal oscillations and the type of machined surface:  $t = 0.25$  mm;  $S_o = 0.095$  mm/rev;  $n = 400$  rpm [6]



**Рис. 2.** Траектории движения заготовки относительно инструмента в сечении, перпендикулярном поверхности резания:  $t = 0,25$  мм;  $S_o = 0,095$  мм/об;  $n = 400$  об/мин [6]

**Fig. 2.** Workpiece movement trajectories relative to the tool in the section perpendicular to the cutting surface:  $t = 0.25$  mm;  $S_o = 0.095$  mm/rev;  $n = 400$  rpm [6]

На рис. 3 приведен пример диаграммы устойчивости для системы с одной степенью свободы. Данный рисунок показывает изменение частоты автоколебаний  $f_0$  и отношение жесткости резания  $k_c$ , и статической жесткости  $k_m$  ТС от частоты вращения. В данном случае отношение указанных жесткостей характеризует возможность ТС обеспечить больший объем удаляемого материала за счет стабильных условий резания. Аналогичная ситуация показана и на рис. 4, где дополнительно отражено изменение фазы автоколебаний в зависимости от скорости резания. Наименьший предел устойчивости и, соответственно, наибольшая амплитуда автоколебаний наблюдаются при свободной регенерации. Стесненность регенерации ограничивает амплитуду автоколебаний и может рассматриваться как средство управления ими. В пределах каждой лепестковой зоны диаграммы с повышением скорости резания плавно увеличивается частота автоколебаний, а фаза постепенно изменяет свое значение от  $0^\circ$  ( $0$ ) до  $+180^\circ$  ( $+\pi$ ). В момент перехода к следующей зоне фаза скачком возвращается к значению  $0^\circ$ . Таким образом, в реальных условиях механической обработки автоколебания происходят с опережением следа около четверти волны.

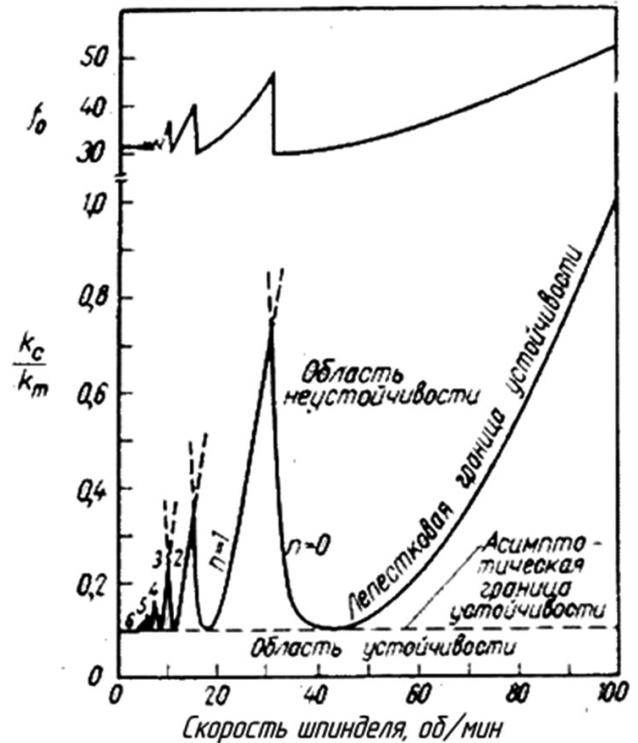


Рис. 3. Диаграмма устойчивости для системы с одной степенью свободы [8]

Fig. 3. Stability diagram for a system with one degree of freedom [8]

Такое опережение создает энергетический источник поддержания и развития автоколебаний. В ходе колебательного движения при выходе инструмента из заготов-

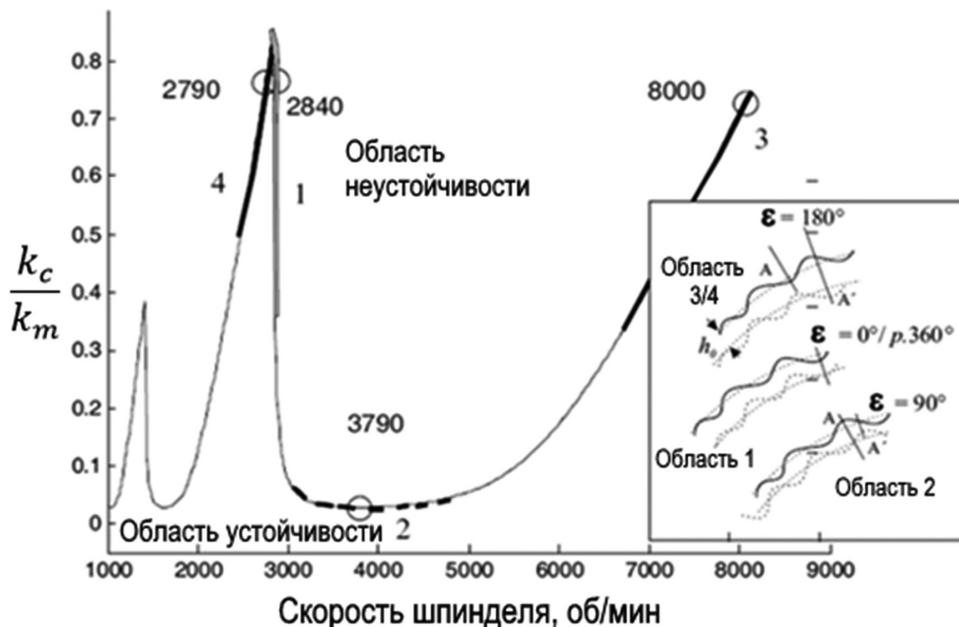


Рис. 4. Изменение фазы автоколебаний в зависимости от скорости резания<sup>6</sup>

Fig. 4. Change in the self-oscillation phase depending on the cutting speed<sup>6</sup>

<sup>6</sup>Ganguli A. Chatter reduction through active vibration damping: PhD dissertation. Université Libre de Bruxelles, 2005. 166 p.

ки толщина срезаемого слоя  $a$  (мкм) и, соответственно, радиальная составляющая силы резания  $F_{\text{вых}}$  оказываются большими, чем сила резания при врезании инструмента в заготовку  $F_{\text{вх}}$  (рис. 5). Положительная разность силы резания определяет порцию энергии, получаемой ТС при каждом колебании. Влияние других значений фазового сдвига автоколебаний представлено на рис. 6. На данном рис. 6 показано направление скорости резания  $V_{\text{рез}}$ . Если текущим колебаниям ТС принудительно сообщить фазу  $-90^\circ$  ( $-\pi/2$ ), т.е. отставание от следа на полволны, то при выходе инструмента из заготовки толщина срезаемого слоя будет меньше чем при врезании и ТС не получит энергии на поддержание автоколебаний. Наоборот, произойдет расходование запасенной ТС энергии, и автоколебания быстро затухнут. При значениях фазы  $0$  и  $+180^\circ$  ( $+\pi$ ) разность толщин среза при врезании и выходе инструмента остается постоянной, сила резания не совершает работы, запас энергии ТС не меняется.

Таким образом, представленная картина объясняет физическую сущность механизма регенерации автоколебаний при лезвийной механической обработке.

Для подавления механизма регенерации автоколебаний существуют следующие пути:

1. Снижение силовой напряженности процесса резания (изменением геометрических параметров лезвий инструментов и их количеством; выбором схемы резания,

например, замены генераторной или профильной схемы резания на групповую и т.д.).

2. Повышение жесткости наиболее слабых элементов ТС или изменение ориентации в пространстве их осей жесткости.

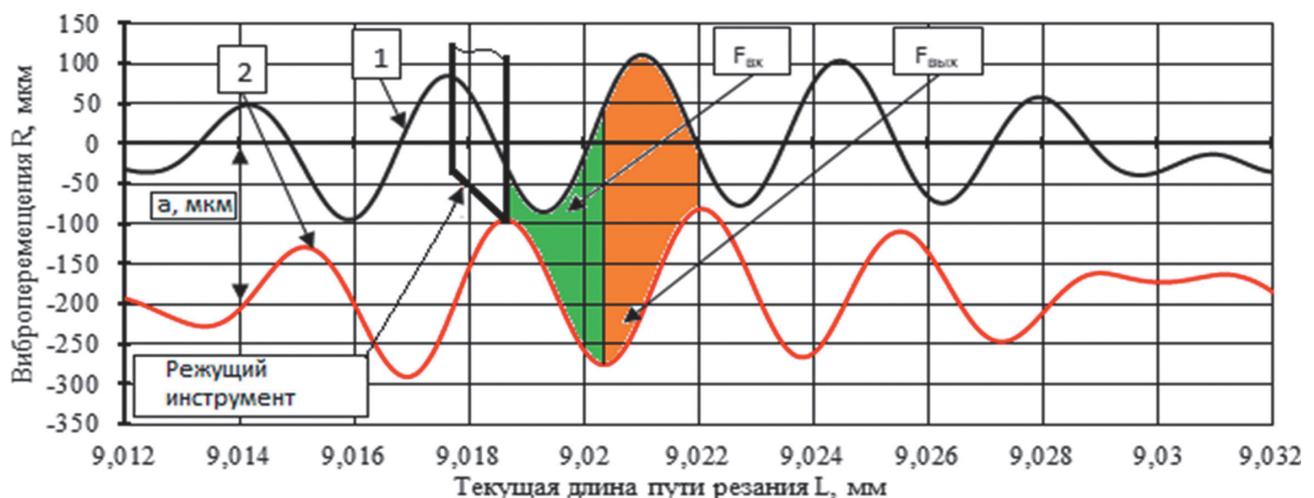
3. Повышение степени демпфирования элементов ТС или самого процесса резания.

4. Подавление механизма регенерации автоколебаний воздействием на их фазу путем использования инструментов с переменным шагом зубьев или модуляции скорости резания.

### СУЩНОСТЬ СПОСОБА ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНЕРГИИ АУТКОЛЕБАНИЙ

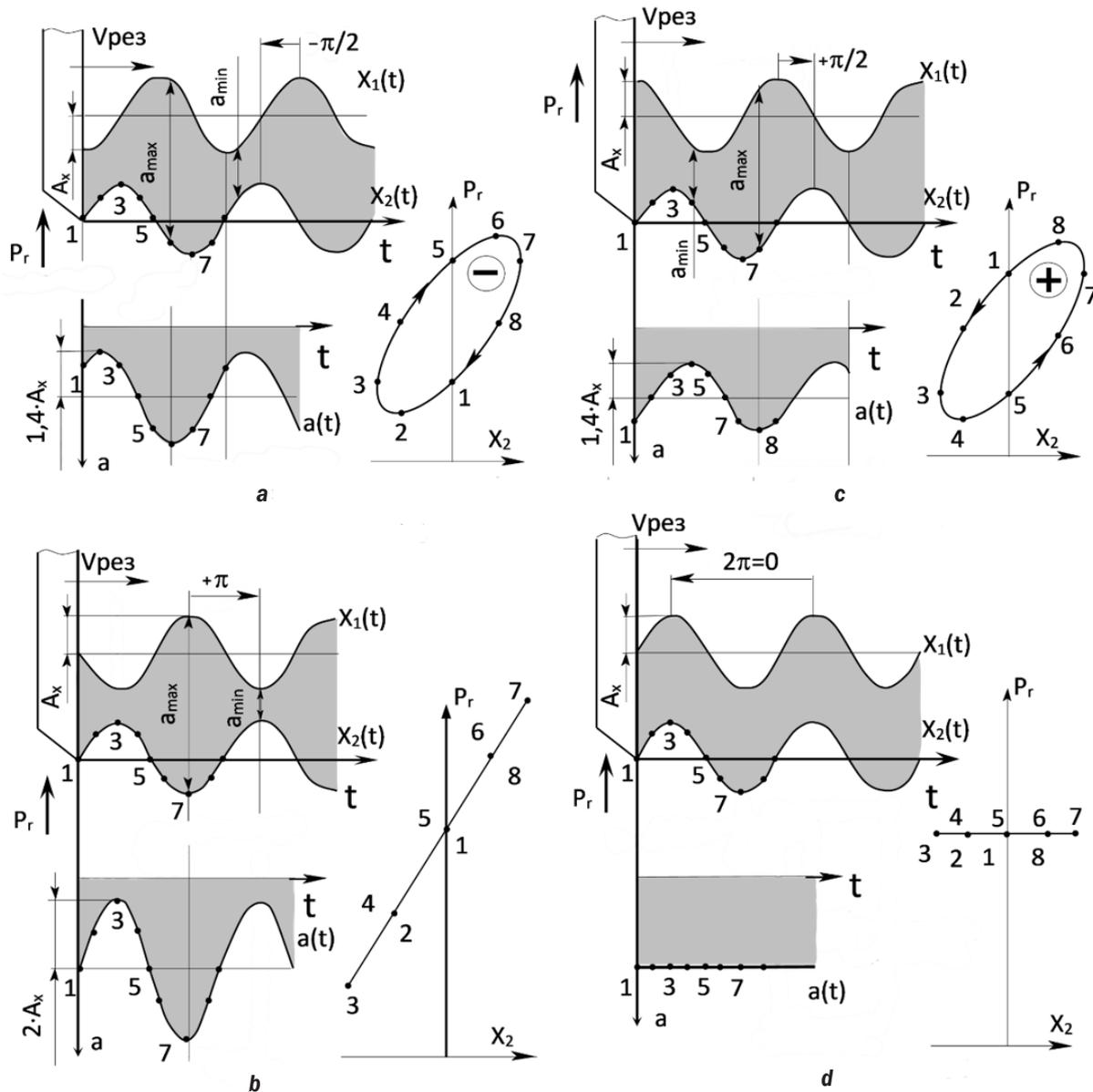
Запас энергии автоколебаний создается работой силы резания. Математически за период одного колебания она выражается интегралом произведения радиальной составляющей силы резания на скорость вибрационного перемещения в нормальном к поверхности резания направлении. Увеличение или уменьшение объема этой энергии ведет, соответственно, к нарастанию или подавлению амплитуды автоколебаний.

Аналитический расчет внутренней энергии автоколебаний требует знания точных значений параметров ТС и процесса резания. Кроме того, он сопряжен с определенными математическими трудностями [10–13]. Расчет может быть значительно упрощен при допущении, что энергия автоколебаний пропорциональна разности площадей участков срезаемого слоя при вы-



**Рис. 5.** Совмещенные траектории текущих автоколебаний и вибрационного следа при постоянной скорости резания и фазовом сдвиге  $+90^\circ$ : 1 – вибрационный след, 2 – текущие автоколебания [9]

**Fig. 5.** Combined trajectories of current self-oscillations and vibration trace at constant cutting speed and phase shift  $+90^\circ$ : 1 – vibration trace, 2 – current self-oscillations [9]



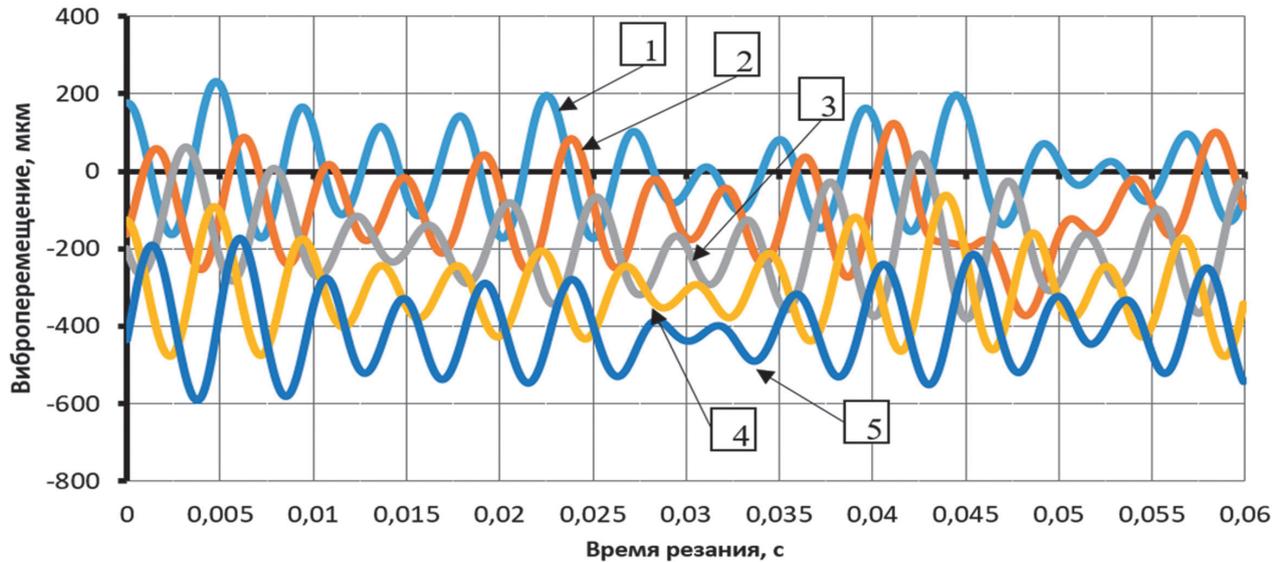
**Рис. 6.** Схемы относительного расположения траекторий колебательного движения смежных зубьев  $X_1(t)$  и  $X_2(t)$ , графики изменения толщины срезаемого слоя  $a(t)$  и диаграммы работы нормальной силы резания  $P_r$  в зависимости от начальной фазы: а -  $\varphi_{21} = \pi/2$ ; б -  $\varphi_{21} = \pi$ ; в -  $\varphi_{21} = 3\pi/2$ ; д -  $\varphi_{21} = 2\pi$  [9]

**Fig. 6.** Diagrams of relative location of oscillatory motion trajectories of adjacent teeth  $X_1(t)$  and  $X_2(t)$ , graphs of cut layer thickness variation  $a(t)$  and diagrams of the normal cutting force  $P_r$  work depending on the initial phase: а -  $\varphi_{21} = \pi/2$ ; б -  $\varphi_{21} = \pi$ ; в -  $\varphi_{21} = 3\pi/2$ ; д -  $\varphi_{21} = 2\pi$  [9]

ходе инструмента из заготовки и врезания. Площади этих участков можно определить по виброграммам относительных колебаний инструмента и заготовки.

Оценка эффективности мероприятия по повышению динамической устойчивости ТС заключается в нахождении расчетным путем по экспериментальным и смоделированным виброграммам степени относительного уменьшения объема внутренней энергии автоколебаний. Экспериментально полученные

виброграммы автоколебаний обычно имеют форму пульсаций (рис. 7). По этим виброграммам определяют частоты собственных автоколебаний и их пульсаций, усредненные за период пульсации значения минимальных и максимальных амплитуд автоколебаний, фазовое смещение на смежных оборотах заготовки и кратность регенеративного эффекта. Для уточнения численных значений этих параметров можно использовать спектральный анализ виброграмм.

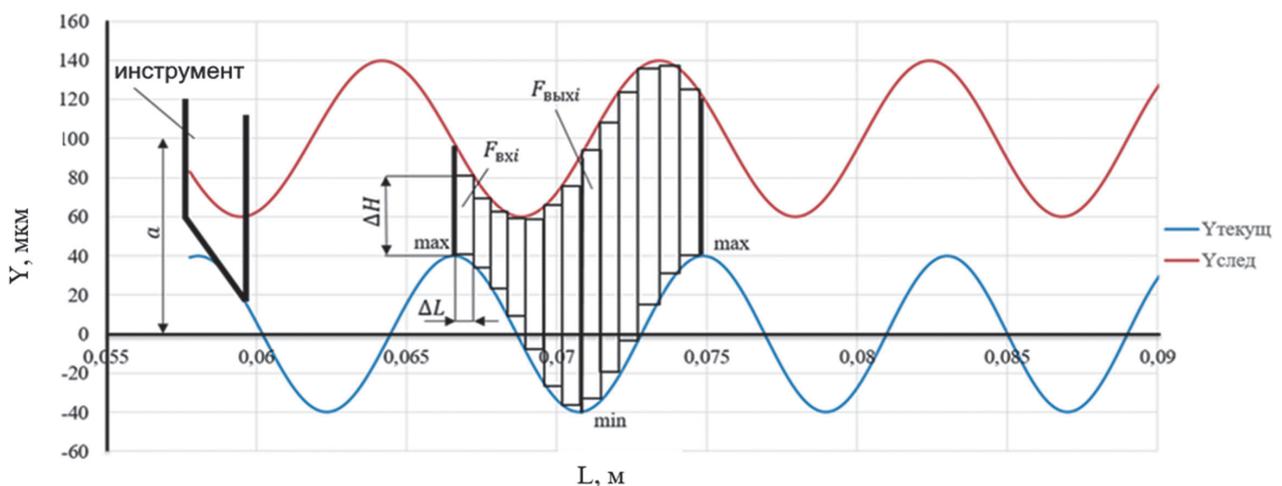


**Рис. 7.** Виброграммы колебаний заготовки при постоянной скорости резания: 1 – первый оборот заготовки, 2 – второй, 3 – третий, 4 – четвертый, 5 – пятый

**Fig. 7.** Workpiece oscillation vibrograms at constant cutting speed: 1 – the first revolution of the workpiece, 2 – the second revolution, 3 – the third revolution, 4 – the fourth revolution, 5 – the fifth revolution

Программа расчета, разработанная в ИРНИТУ, написана на языке программирования SciLab. Первый этап расчета служит определению объема энергии автоколебаний ТС в исходном состоянии, т.е. до применения специального мероприятия. Для количества оборотов, превышающего кратность регенеративного эффекта на единицу, строят последовательно расположенные траектории относительного вибрационного перемещения инструмента и заготовки в направлении условной координаты  $Y$  с параметрами, определенными опытным путем. В каждом текущем автоколебании, входящем в цикл пульсации, рассчитывают площади участков

врезания и выхода инструмента из заготовки как суммы площадей элементарных прямоугольников, размещаемых на этих участках (рис. 8). Ширину прямоугольников  $\Delta L$  выбирают равной длине пути резания  $L$  за одну двадцатую периода автоколебаний. Высота каждого из прямоугольников  $\Delta H$  определяется расстоянием до ближайшей траектории одного из предыдущих проходов. Для каждого колебания, входящего в цикл пульсации, рассчитывают разность площадей участков выхода и врезания инструмента. Далее эту разность усредняют за цикл пульсации и принимают в качестве эталонной меры энергии автоколебаний ТС в исходном состоянии.



**Рис. 8.** Схема расчета площадей участков врезания и выхода инструмента из заготовки

**Fig. 8.** Calculation scheme of areas of tool entry and exit from the workpiece

Второй этап расчета определяет запас энергии автоколебаний ТС после реализации мероприятия по их подавлению. Каждое такое мероприятие ослабляет регенеративный эффект процесса резания вследствие изменения размеров, формы и взаимного расположения траекторий вибрационных следов. В ходе второго этапа расчета выявляют влияние исходных параметров мероприятия на трансформацию вибрационных траекторий. Далее, согласно установленным закономерностям, задают несколько значений исходных параметров или их сочетаний и для каждого из них моделируют набор вибрационных траекторий, по которым рассчитывают объем внутренней энергии автоколебаний, сравниваемый с эталонным значением. Такая манипуляция позволяет установить наилучшие значения параметров мероприятия для подавления автоколебаний. Пример конкретного использования описанного способа приведен в следующем разделе.

### **ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ СПОСОБА ДЛЯ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ МОДУЛЯЦИИ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ**

Одним из сравнительно новых способов повышения динамической устойчивости токарной обработки является применение модулированной, т.е. периодически изменяемой по определенному закону скорости резания. Чаще других используют гармонический (синусоидальный) закон изменения скорости из-за большей простоты реализации. Он характеризуется двумя безразмерными параметрами: RVF (от англ. Relative Variation Frequency) – количеством изменений скорости резания за один оборот заготовки или инструмента и RVA (от англ. Ratio of Variation Amplitude) – отношением величины приращения или убывания скорости к величине ее среднего значения.

Модуляция скорости резания изменяет форму траектории относительного колебательного движения инструмента и заготовки, чередуя последовательное ее растяжение и сжатие в каждом цикле модуляции. Вследствие этого фазовый сдвиг автоколебаний в течение цикла модуляции скорости резания изменяется от  $+90^\circ$  ( $+\pi/2$ ) до некоторой

меньшей величины (в пределе до  $-90^\circ$  ( $-\pi/2$ )) и обратно. При значении фазового сдвига  $+90^\circ$  разность силы резания в течение одного колебания положительна и ТС получает порцию энергии за этот период. Если фазовый сдвиг равен  $-90^\circ$ , то разность силы резания отрицательна и энергия из системы отводится. При фазовых сдвигах  $0$  и  $180^\circ$  разность силы резания нулевая и подвода или отвода энергии не происходит. Амплитуда автоколебаний также меняется: она максимальна на участках траектории движения инструмента, где фазовый сдвиг близок к  $+90^\circ$ , и минимальна при  $-90^\circ$ . В целом повышение параметров модуляции скорости резания до определенных значений способствует устойчивому снижению амплитуды автоколебаний или даже их полному гашению, если объем энергии возбуждения от регенеративного эффекта, ослабленного модуляцией скорости резания, станет меньше объема энергии, затрачиваемой на диссипацию в ТС.

Приоритет применения модулированной скорости резания против автоколебаний принадлежит нашей стране [14]. Начиная с 70-х годов прошлого века, активное изучение этого вопроса проводят во всем мире [15–24 и др.]. Исследования показали высокую эффективность подавления автоколебаний, технологическую гибкость и удобство применения модулированной скорости резания. Имеются примеры оснащения функцией модуляции скорости резания систем числового программного управления металлорежущих станков: фирма Haas Automation (США)<sup>7</sup>.

Однако широкого промышленного применения модуляция скорости резания не получила. Это связано с отсутствием научно обоснованных рекомендаций по выбору частоты и глубины модуляции. Отыскание этих параметров опытным путем чрезвычайно трудоемко и требует больших расходов материальных ресурсов. Математическое моделирование связано с большими затратами времени и нуждается в точной идентификации динамики станка и параметров процесса резания. Поэтому в последнее время эту задачу решают на основе анализа внутренней энергии автоколебаний [10–13].

Э. Аль-Региб [10] при известной частоте

<sup>7</sup>Spindle Speed Variation - Stop chatter on your CNC lathe - Haas Automation. Режим доступа: [https://www.reddit.com/r/Machinists/comments/49wt98/spindle\\_speed\\_variation\\_stop\\_chatter\\_on\\_your\\_cnc/?rdt=38274](https://www.reddit.com/r/Machinists/comments/49wt98/spindle_speed_variation_stop_chatter_on_your_cnc/?rdt=38274) (дата обращения: 18.07.2024).

автоколебаний и заданной скорости резания на основе вычисления минимума работы радиальной составляющей силы резания, средней за цикл модуляции скорости, предложил простые эвристические уравнения для определения требуемой глубины модуляции скорости резания. Недостатком предложенного в статье способа расчета внутренней энергии автоколебаний является ограниченность области применения – только для условий обработки, соответствующих однократному регенеративному эффекту. Однако на практике обработка часто ведется в условиях многократного регенеративного эффекта, например, чистовое точение валов с малыми значениями глубины резания и подачи.

Х. Чжан [11] предлагает назначать частоту модуляции в диапазоне 0,5...2,0 % от частоты автоколебаний. Требуемая глубина модуляции определяется с использованием функции Бесселя, исходя из равенства объемов вносимой в ТС и диссипируемой из нее энергии. Недостатками предложенной методики являются высокая вычислительная сложность и необходимость предварительного определения (обычно трудоемким опытным путем) параметров ТС и процесса резания.

С. Ямато [12, 13] использовал аналогию модуляции скорости резания с частотной модуляцией FM (от англ. Frequency Modulation) в радиотехнике. Для нахождения глубины модуляции скорости резания, соответствующей минимуму внутренней энергии автоколебаний, он использовал функцию Бесселя первого рода  $n$ -го порядка с аргументом в виде индекса модуляции, представляющим собой отношение максимального сдвига частоты автоколебаний к частоте модуляции скорости резания. Индекс модуляции выражают через глубину модуляции скорости, количество волн автоколебаний на поверхности резания и их сдвиг при постоянной скорости резания. Условию подавления автоколебаний соответствуют локальные минимумы функции Бесселя, график которой похож на график косинусоиды с постепенно уменьшающимся размахом.

Предложенные в работах [10–12] методики отыскания параметров модуляции скорости резания требуют предварительного нахождения параметров ТС и процесса резания. Предлагаемый нами способ опирается только на полученные опытным путем виброграммы относительных колебаний инструмента и заготовки на принятых режимах резания. Информация о параметрах ТС и процесса резания заложена в виброграммах автоматически.

Определение наилучших значений параметров RVF и RVA выполняется на основе сравнения объемов разности площадей срезаемого слоя при выходе и врезании инструмента, работающего с постоянной и модулированной скоростью резания. Нахождение эталонного значения разности площадей при постоянной скорости резания описано в предыдущем разделе. Вторая часть расчета для конкретных значений RVF и RVA содержит нахождение мгновенной (текущей) длины пути резания и последующее определение разности площадей в каждом колебании в течение оборота заготовки, его средних значений на каждом обороте и в целом за цикл модуляции. Их соотношение с эталонным значением определяет соответствующие величины коэффициента изменения разности площадей  $K_{ирп}$ , по минимальным значениям которых выбирают искомые значения параметров RVF и RVA. Более детальная информация об алгоритме расчета приведена в материалах заявки на государственную регистрацию программы для ЭВМ<sup>8</sup>.

С целью иллюстрации применения предложенной методики отыскания параметров модуляции скорости резания рассмотрим конкретный пример точения маложесткой заготовки.

В качестве последней использовали конусоно закрепленный вал из стали 30ХГСА диаметром  $D = 48$  мм и вылетом 150 мм из кулачков. Измеренная частота собственных колебаний заготовки составила 145 Гц. Точение проводили прямым левым проходным резцом SDNCN 2020K 11 со сменной многогранной пластиной DCMT 11 T3 08-MM 1125.

<sup>8</sup>Свидетельство о гос. регистрации прогр. № 2020618392, Российская Федерация. Программа расчета внутренней энергии автоколебаний при продольном точении с модуляцией скорости резания / В.М. Свинин, А.В. Шутенков, В.А. Ушаков, А.С. Пятых, М.А. Панин; правообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет. Дата поступления 15.07.2020; дата гос. регистрации в Реестре 24.07.2020.

Резец был установлен в револьверной головке станка. Обработку проводили при глубине резания 0,8 мм с подачей 0,122 мм/об и частотой вращения шпинделя 208 об/мин. Использовали как постоянную скорость резания, так и модулированную по гармоническому закону.

Фиксацию виброперемещений заготовки в процессе резания выполняли с помощью оптической сенсорной головки OFV 505. Площадкой для измерений вибраций служил специально подготовленный поясok на заготовке, расположенный на расстоянии 122,8 мм от кулачков патрона. На заготовке было проточено тринадцать поясков шириной 5 мм на разных режимах резания, пять из которых было отобрано для последующего анализа. Для обеспечения равенства условий возбуждения автоколебаний на поясках, расположенных на разных расстояниях от кулачков, ординаты виброграмм, записанных на этих поясках, умножали на индивидуальный коэффициент приведения, рассчитанный по формулам теории сопротивления материалов.

Для нахождения наилучших параметров модуляции скорости резания применили описанный выше способ. Согласно рекомендациям<sup>8</sup> частоту модуляции приняли  $RVF = 0,5$ . Изменение внутренней энергии автоколебаний рассчитывали для глубины модуляции в диапазоне  $RVA = 0...30\%$ . График зависимости коэффициента  $K_{ИРП}$  от  $RVA$  представлен на рис. 9. Он показывает, что модуляция скорости резания небольшой (1%) глубины

приводит к большому (примерно на 90%) уменьшению запаса внутренней энергии автоколебаний. Дальнейшее увеличение глубины модуляции меняет знак запаса энергии, т.е. энергия не поступает в ТС для поддержания автоколебаний, а изымается из нее. При глубине модуляции 2% диссипация энергии составляет 35%. Последующее увеличение  $RVA$  сопровождается периодическим колебанием запаса энергии около нулевого значения.

Подобная картина изменения запаса внутренней энергии автоколебаний с нарастанием глубины модуляции скорости резания получена в работах С. Ямато [12, 13], что иллюстрирует график на рис. 10. График отражает значение функции Бесселя нулевого порядка первого рода, характеризующей объем энергии автоколебаний при увеличении индекса модуляции, пропорционального  $RVA$ . Условию подавления автоколебаний соответствуют локальные минимумы энергии. Однако в работах [12, 13] отмечается, что первый локальный минимум не всегда способен подавить автоколебания, поскольку из-за малости глубины модуляции энергия не успевает рассеяться.

Согласно рассчитанному изменению объема внутренней энергии автоколебаний (см. рис. 9) были проведены четыре опыта на следующих режимах точения: один с постоянной скоростью резания и три с модулированной, соответствующие первому, второму и четвертому локальным минимумам энергии, т.е.  $RVA = 0, 2, 6$  и  $13,5\%$ . Зарегистри-

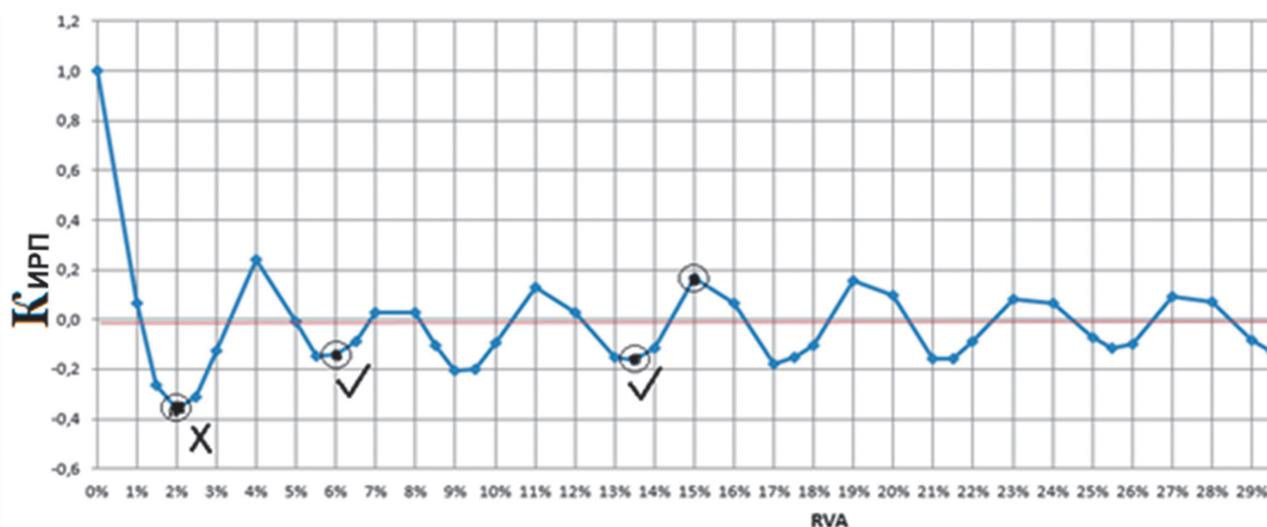
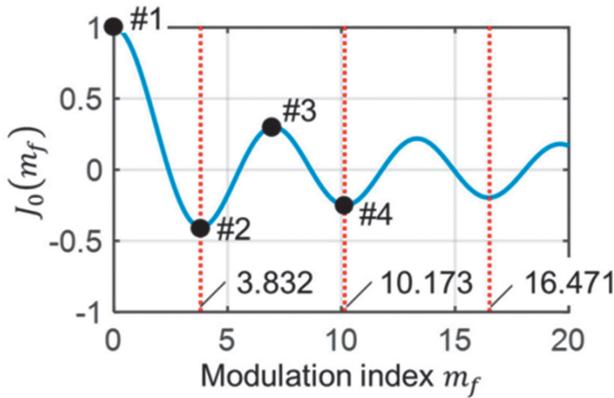


Рис. 9. Изменение коэффициента  $K_{ИРП}$  с увеличением  $RVA$ :  $RVF = 0,5$   
Fig. 9.  $K_{ИРП}$  coefficient variation with  $RVA$  increase:  $RVF = 0.5$

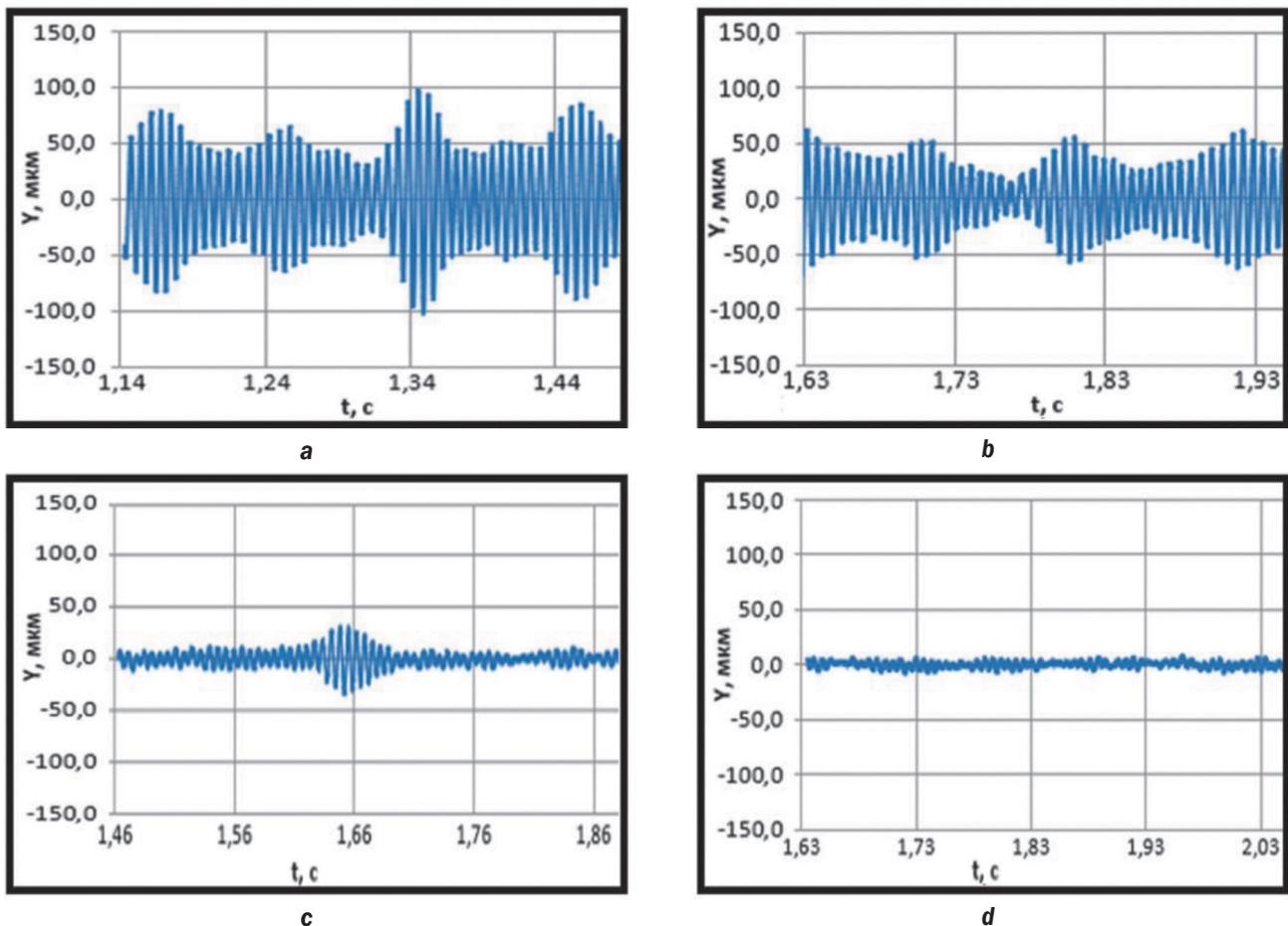


**Рис. 10.** Значение функции Бесселя нулевого порядка первого рода при возрастании индекса модуляции [12]  
**Fig. 10.** The value of the zero-order Bessel function of the first kind with modulation index increase [12]

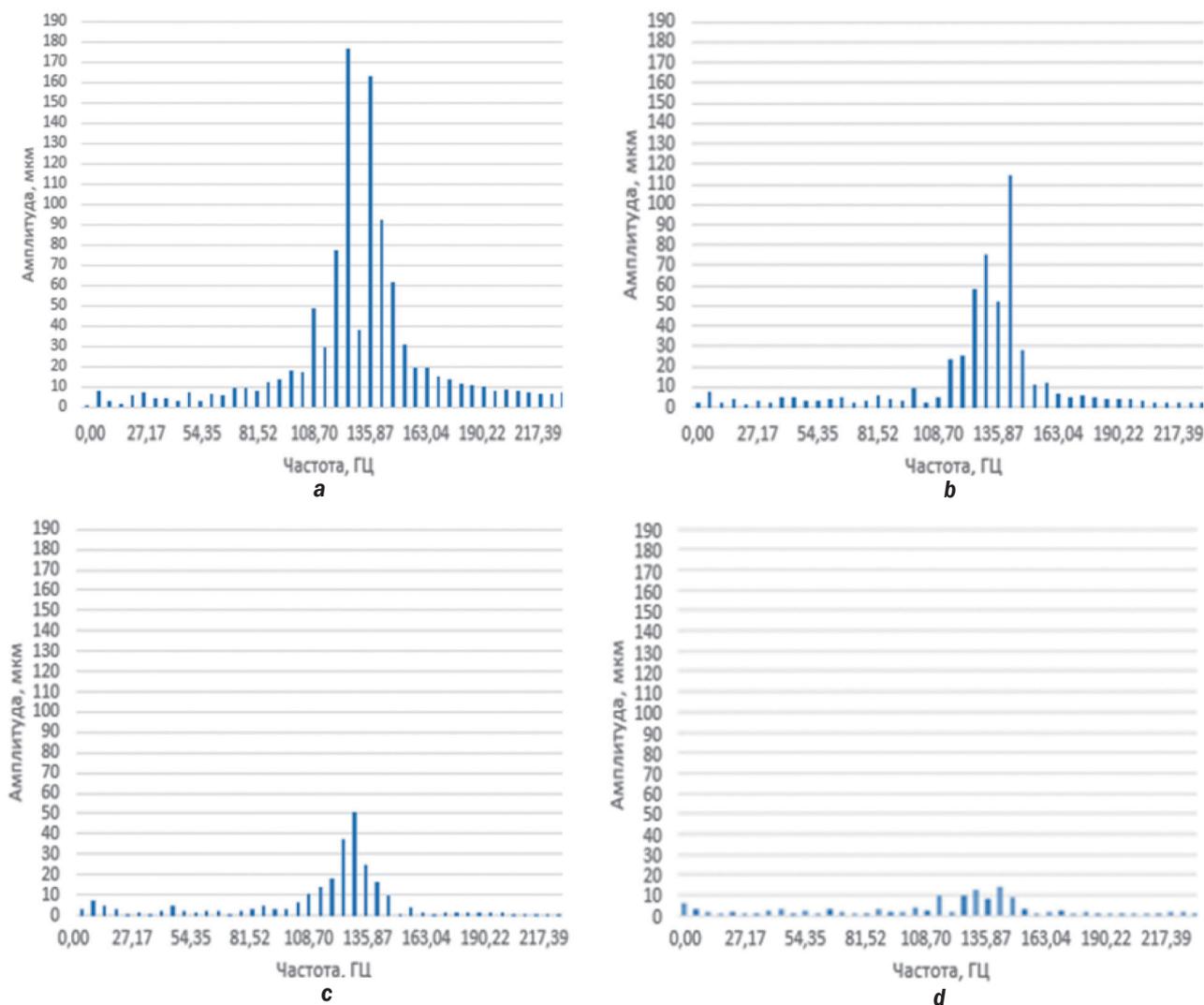
рованные в опытах виброграммы относительных колебаний заготовки и инструмента представлены на рис. 11, а их спектрограммы – на рис. 12. Фотографии обработанных поверхностей показаны на рис. 14.

На рис. 13 видно, что с переходом от постоянной скорости резания к модулированной и ростом глубины последней следы вибраций постепенно уменьшаются. Размахи  $R$  колебаний (см. рис. 11) и амплитуды  $A$  основной гармоники автоколебаний (см. рис. 12) в указанной последовательности также снижаются: а –  $R = 204$  мкм и  $A = 176$  мкм, б –  $R = 124$  мкм и  $A = 114$  мкм, в –  $R = 64$  мкм и  $A = 50$  мкм, г –  $R = 20$  мкм и  $A = 14$  мкм. Наиболее эффективной оказалась модуляция скорости резания с глубиной 13,5%. По сравнению с постоянной скоростью резания она обеспечила снижение размаха колебаний более 10 раз, а амплитуды автоколебаний – более 12 раз.

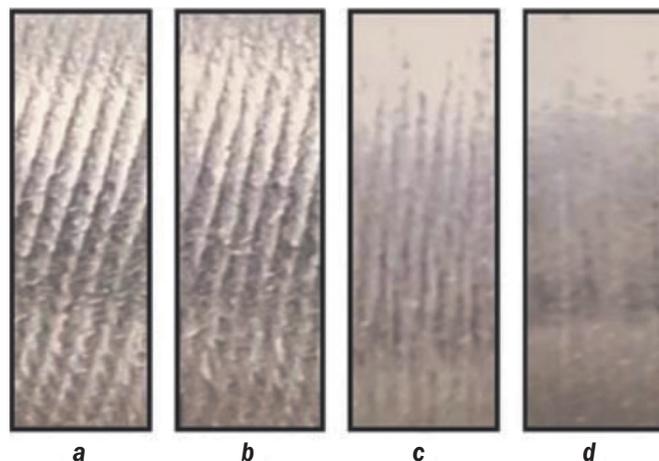
Таким образом, результаты вычисления зависимости коэффициента  $K_{ИРП}$  от роста глубины модуляции скорости резания позволили назначить рациональное значение  $RVA = 13,5\%$  при выбранном значении



**Рис. 11.** Виброграммы относительных колебаний заготовки и инструмента: а –  $RVF = 0$  и  $RVA = 0$ ; б –  $RVF = 0,5$  и  $RVA = 2\%$ ; в –  $RVF = 0,5$  и  $RVA = 6\%$ ; д –  $RVF = 0,5$  и  $RVA = 13,5\%$   
**Fig. 11.** Vibrograms of workpiece and tool relative vibrations : а –  $RVF = 0$  and  $RVA = 0$ ; б –  $RVF = 0.5$  and  $RVA = 2\%$ ; в –  $RVF = 0.5$  and  $RVA = 6\%$ ; д –  $RVF = 0.5$  and  $RVA = 13.5\%$



**Рис. 12.** Спектрограммы относительных колебаний заготовки и инструмента: а - RVF = 0 и RVA = 0; б - RVF = 0,5 и RVA = 2%; в - RVF = 0,5 и RVA = 6%; д - RVF = 0,5 и RVA = 13,5%  
**Fig. 12.** Spectrograms of workpiece and tool relative vibrations: а - RVF = 0 and RVA = 0; б - RVF = 0.5 and RVA = 2%; в - RVF = 0.5 and RVA = 6%; д - RVF = 0.5 and RVA = 13.5%



**Рис. 13.** Фотографии обработанных поверхностей при точении: а - RVF = 0 и RVA = 0; б - RVF = 0,5 и RVA = 2%; в - RVF = 0,5 и RVA = 6%; д - RVF = 0,5 и RVA = 13,5%  
**Fig. 13.** Images of the surfaces machined by turning: а - RVF = 0 and RVA = 0; б - RVF = 0.5 and RVA = 2%; в - RVF = 0.5 and RVA = 6%; д - RVF = 0.5 and RVA = 13.5%

$RVF = 0,5$  для эффективного подавления автоколебаний. Опыты по точению подтвердили правильность этого выбора. На основании изложенного можно считать доказанной эффективность способа нахождения рациональных значений параметров технических мероприятий по повышению динамической устойчивости ТС путем определения их влияния на изменение объема внутренней энергии автоколебаний.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый экспериментально-расчетный способ определения изменения объема внутренней энергии автоколебаний при применении технических мероприятий по повышению динамической устойчивости ТС. Способ основан на допущении пропорциональности объема внутренней энергии автоколебаний разности площадей участков срезаемого слоя при выходе инструмента из заготовки и врезании. Сущность способа заключается в расчете указанной разности площадей до и после применения мероприятия по повышению динамической устойчивости ТС. Расчет разности площадей выполняют на последовательно расположенных смоделированных траекториях относительных колебаний заготовки и инструмента, средние значения параметров которых определены опытным путем из процесса резания при ис-

ходном состоянии ТС. Способ предназначен для установления наилучших значений параметров технических мероприятий.

Пример реализации способа приведен для случая отыскания наилучших параметров модуляции скорости резания при точении с целью подавления автоколебаний консолюдно закрепленной заготовки. Полученная расчетом графическая зависимость разности площадей участков выхода и врезания при нарастании глубины модуляции скорости резания позволила найти наилучшее значение  $RVA = 13,5\%$  при выбранном  $RVF = 0,5$ . Проведенные затем опыты по точению показали, что модулированная с найденными параметрами скорость резания обеспечила по сравнению с постоянной скоростью снижение размаха колебаний более 10 раз и амплитуды колебаний более 12 раз, что доказывает эффективность и достоверность предложенного способа.

Этот способ может найти широкое применение для подавления автоколебаний при разных видах механической обработки. Например, синтез новых более эффективных законов модуляции скорости резания взамен используемых сейчас гармонического, треугольного и трапецеидального законов; нахождение требуемой разности шагов зубьев многолезвийных инструментов и другие случаи.

## Список источников

1. Quintana G., Ciurana J. Chatter in machining processes // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2011. Vol. 51. P. 363–376. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.01.001>.
2. Munoa J., Beudaert X., Dombovari Z., Altintas Y., Budak E., Brecher C., et al. Chatter suppression techniques in metal cutting // CIRP Annals. 2016. Vol. 65. Iss. 2. P. 785–808. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.004>.
3. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Изд-во Машиностроение, 1967. 359 с.
4. Ташлицкий Н.И. Первичный источник энергии возбуждения автоколебаний при резании металлов // Вестник машиностроения. 1960. № 2. С. 45–50.
5. Зарс В.В. Оценка некоторых механизмов возбуждения вибрации при точении // Автоколебания станков. Вопросы механики и машиностроения: сб. науч. тр. Рига: Рижский технический университет, 1967. Вып. 6. С. 15–46.
6. Свинин В.М., Самсонов А.В., Большухин А.О. Подавление автоколебаний при точении нежестких валов пружинящим резцом // Механика – XXI веку. 2014. № 13. С. 112–119. EDN: TIYQNJ.
7. Свинин В.М. Фрезерование с модулированной скоростью резания. Иркутск: ИрГТУ, 2007. 302 с.
8. Merritt H.E. Theory of self-excited machine tool chatter // Journal of Engineering for Industry-Transactions of the ASME. 1965. Vol. 87. P. 447–454.
9. Свинин В.М. Самоорганизация вторичных автоколебаний при лезвийной обработке // СТИН. 2006. № 1. С. 7–13.
10. Al-Regib E., Ni Jun, Lee Soo-Hun. Programming spindle speed variation for machine tool chatter suppression // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2003. Vol. 43. Iss. 12. P. 1229–1240. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00126-3](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00126-3).
11. Zhang H., Ni Jun. Internal energy based analysis on mechanism of spindle speed variation for regenerative chatter control // Journal of Vibration and Control. 2010. Vol. 16. Iss. 2. P. 281–301. <https://doi.org/10.1177/1077546309103562>.

12. Yamato S., Ito T., Matsuzaki H., Kakinuma Y. Programmable optimal design of sinusoidal SSV for regenerative chatter suppression // *Procedia Manufacturing*. 2018. Vol. 18. P. 152–160. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2018.11.020>.
13. Yamato S., Ito T., Matsuzaki H., Fujita J., Kakinuma Ya. Self-acting optimal design of spindle speed variation for regenerative chatter suppression based on novel analysis of internal process energy behavior // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2020. Vol. 159. Part A. P. 103639. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103639>.
14. Шнепс В.А. Экспериментальное исследование влияния синусоидального изменения скорости на устойчивость резания // *Вопросы динамики и прочности*. 1970. Вып. 20. С. 123–130.
15. Takemura T., Kitamura T., Hoshi T., Okushimo K. Active suppression of chatter by programmed variation of spindle speed // *CIRP Annals*. 1974. Vol. 23. Iss. 1. P. 62–76.
16. Inamura T., Sata T. Stability analysis of cutting under varying spindle speed // *CIRP Annals*. 1974. Vol. 23. Iss. 1. P. 119–120. <https://doi.org/10.2493/JJSPE1933.43.80>.
17. Hoshi T., Sakisaka N., Moriyama I., Sato M., Higashimoto A., Tokunaga T. Study on practical application of fluctuating speed cutting for regenerative chatter control // *The Japan Society of Mechanical Engineers*. 1978. Vol. 44. Iss. 379. P. 1085–1093. <https://doi.org/10.1299/kikai1938.44.1085>.
18. Sexton J., Stone B. The stability of machining with continuously varying spindle speed // *CIRP Annals*. 1978. Vol. 27. Iss. 1. P. 317–326.
19. Jemielniak K., Widota A. Suppression of self-excited vibration by the spindle speed variation method // *International Journal of Machine Tool Design and Research*. 1984. Vol. 24. Iss. 3. P. 207–214. [https://doi.org/10.1016/0020-7357\(84\)90005-2](https://doi.org/10.1016/0020-7357(84)90005-2).
20. Jayaram S., Kapoor S., DeVor R. Analytical stability analysis of variable spindle speed machining // *Journal of Manufacturing Science & Engineering*. 2000. Vol. 122. Iss. 3. P. 391–397. <https://doi.org/https://doi.org/10.1115/1.1285890>.
21. Inesperger T., Stepan G. Stability analysis of turning with periodic spindle speed modulation via semi-discretisation // *Journal of Vibration & Control*. 2004. Vol. 10. Iss. 12. P. 1835–1855. <https://doi.org/10.1177/10775463040444891>.
22. Otto A., Radons G. Application of spindle speed variation for chatter suppression in turning // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2013. Vol. 6. Iss. 2. P. 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2013.02.002>.
23. Urbikain G., Olvera D., De Lacalle L.N.L., Elías-Zúñiga A. Spindle speed variation technique in turning operations: modeling and real implementation // *Journal of Sound and Vibration*. 2016. Vol. 383. P. 384–396. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.07.033>.
24. Longyang Ding, Sun Yuxin, Xiong Zhenhua. Active chatter suppression in turning by simultaneous adjustment of amplitude and frequency of spindle speed variation // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2020. Vol. 142. Iss. 2. P. 021004-1–021004-10. <https://doi.org/10.1115/1.4045618>.
25. Свинин В.М. Выбор параметров модуляции скорости резания для гашения регенеративных автоколебаний // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2006. № 41. С. 135–142. EDN: JWQPQV.

## References

1. Quintana G., Ciurana J. Chatter in machining processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2011;51:363-376. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.01.001>.
2. Munoa J., Beudaert X., Dombovari Z., Altintas Y., Budak E., Brecher C., et al. Chatter suppression techniques in metal cutting. *CIRP Annals*. 2016;65(2):785-808. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.004>.
3. Kudinov V.A. *Machine tool dynamics*. Moscow: Mashinostroenie; 1967, 359 p. (In Russ.).
4. Tashlitskiy N.I. *Primary source of self-oscillation excitation energy during metal cutting*. *Russian Engineering Research*. 1960;2:45-50. (In Russ.).
5. Zars V.V. *Evaluating some vibration excitation mechanisms under turning*. In: *Avtokolebaniya stankov. Voprosy mekhaniki i mashinostroeniya: sbornik nauchnyh trudov = Self-Oscillations of machine tools. Questions of mechanics and mechanical engineering: collected scientific papers*. Riga: Rīgas Tehniskā universitāte; 1967, iss. 6, p. 15-46. (In Russ.).
6. Svinin V.M., Samsonov A.V., Bol'shuhin A.O. Suppression of self-excited oscillations during turning of non-rigid shafts with a springy cutter. *Mechanical engineers to XXI century*. 2014;13:112-119. (In Russ.). EDN: TIYQNJ.
7. Svinin V.M. *Milling with modulated cutting speed*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2007, 302 p. (In Russ.).
8. Merritt H.E. Theory of self-excited machine tool chatter. *Journal of Engineering for Industry-trans- actions of the ASME*. 1965;87:447-454. (In Russ.).
9. Svinin V.M. Self-organization of secondary self-oscillations in edge cutting machining. *Machines and Tooling*. 2006;1:7-13. (In Russ.).
10. Al-Regib E., Ni Jun, Lee Soo-Hun. Programming spindle speed variation for machine tool chatter suppression. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2003;43(12):1229-1240. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00126-3](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00126-3).

11. Zhang H., Ni Jun. Internal energy based analysis on mechanism of spindle speed variation for regenerative chatter control. *Journal of Vibration and Control*. 2010;16(2):281-301. <https://doi.org/10.1177/1077546309103562>.
12. Yamato S., Ito T., Matsuzaki H., Kakinuma Y. Programmable optimal design of sinusoidal SSV for regenerative chattersuppression. *Procedia Manufacturing*. 2018;18:152-160. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2018.11.020>.
13. Yamato S., Ito T., Matsuzaki H., Fujita J., Kakinuma Ya. Self-acting optimal design of spindle speed variation for regenerative chatter suppression based on novel analysis of internal process energy behavior. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2020;159(A):103639. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103639>.
14. Shneps V.A. Experimental study of the effect of sinusoidal speed variation on cutting stability. *Voprosy dinamiki i prochnosti*. 1970;20:123-130. (In Russ.).
15. Takemura T., Kitamura T., Hoshi T., Okushimo K. Active suppression of chatter by programmed variation of spindle speed. *CIRP Annals*. 1974;23(1):62-76.
16. Inamura T., Sata T. Stability analysis of cutting under varying spindle speed. *CIRP Annals*. 1974;23(1):119-120. <https://doi.org/10.2493/JJSPE1933.43.80>.
17. Hoshi T., Sakisaka N., Moriyama I., Sato M., Higashimoto A., Tokunaga T. Study on practical application of fluctuating speed cutting for regenerative chatter control. *The Japan Society of Mechanical Engineers*. 1978;44(379):1085-1093. <https://doi.org/10.1299/kikai1938.44.1085>.
18. Sexton J., Stone B. The stability of machining with continuously varying spindle speed. *CIRP Annals*. 1978;27(1):317-326.
19. Jemielniak K., Widota A. Suppression of self-excited vibration by the spindle speed variation method. *International Journal of Machine Tool Design and Research*. 1984;24(3):207-214. [https://doi.org/10.1016/0020-7357\(84\)90005-2](https://doi.org/10.1016/0020-7357(84)90005-2).
20. Jayaram S., Kapoor S., DeVor R. Analytical stability analysis of variable spindle speed machining. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*. 2000;122(3):391-397. <https://doi.org/https://doi.org/10.1115/1.1285890>.
21. Insperger T., Stepan G. Stability analysis of turning with periodic spindle speed modulation via semi-discretisation. *Journal of Vibration & Control*. 2004;10(12):1835-1855. <https://doi.org/10.1177/1077546304044891>.
22. Otto A., Radons G., Application of spindle speed variation for chatter suppression in turning. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2013;6(2):102-109. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2013.02.002>.
23. Urbikain G., Olvera D., De Lacalle L.N.L., Elías-Zúñiga A. Spindle speed variation technique in turning operations: modeling and real implementation. *Journal of Sound and Vibration*. 2016;383:384-396. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.07.033>.
24. Longyang Ding, Sun Yuxin, Xiong Zhenhua. Active chatter suppression in turning by simultaneous adjustment of amplitude and frequency of spindle speed variation. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2020;142(2):021004-1-021004-10. <https://doi.org/10.1115/1.4045618>.
25. Svinin V.M. Cutting speed modulation parameter selection for chatter suppression. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2006;41:135-142. (In Russ.). EDN: JWQPQV.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ****INFORMATION ABOUT THE AUTHORS****Свинин Валерий Михайлович,**

д.т.н., профессор,  
профессор кафедры технологии и оборудования  
машиностроительных производств,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
✉ [svinin\\_vm@mail.ru](mailto:svinin_vm@mail.ru)

**Valery M. Svinin,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Professor of the Department of Mechanical  
Engineering Production  
Technologies and Equipment,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
✉ [svinin\\_vm@mail.ru](mailto:svinin_vm@mail.ru)

**Ушаков Владислав Александрович,**

аспирант,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
[kaivokaiva@yandex.ru](mailto:kaivokaiva@yandex.ru)  
[pren.prr@mail.ru](mailto:pren.prr@mail.ru)

**Vladislav A. Ushakov,**

Postgraduate Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
[kaivokaiva@yandex.ru](mailto:kaivokaiva@yandex.ru)  
[pren.prr@mail.ru](mailto:pren.prr@mail.ru)

**Савилов Андрей Владиславович,**

к.т.н., доцент,  
доцент кафедры технологии и оборудования  
машиностроительных производств,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
[saw@istu.edu](mailto:saw@istu.edu)

**Andrey V. Savilov,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of  
Mechanical Engineering Production  
Technologies and Equipment,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
[saw@istu.edu](mailto:saw@istu.edu)

**Пятых Алексей Сергеевич,**

к.т.н.,  
доцент кафедры технологии и оборудования  
машиностроительных производств,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
pyatykhas@ex.istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0002-4116-9190>

**Aleksey S. Pyatykh,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor  
of the Department of Mechanical  
Engineering Production  
Technologies and Equipment,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
pyatykhas@ex.istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0002-4116-9190>

**Иринчеев Андрей Андреевич,**

аспирант,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
andrey.iaa2000@yandex.ru

**Andrey A. Irincheev,**

Postgraduate Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
andrey.iaa2000@yandex.ru

**Заявленный вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Authors' contribution**

The authors contributed equally to the article.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 12.10.2024 г.; одобрена после рецензирования 30.10.2024 г.; принята к публикации 07.11.2024 г.

**Information about the article**

The article was submitted 12.10.2024; approved after reviewing 30.10.2024; accepted for publication 07.11.2024.