

**Чистофорова Наталья Васильевна**,  
к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,  
e-mail: ryabinak@mail.ru

**Зубков Никита Вячеславович**,  
магистрант, Ангарский государственный технический университет,  
e-mail: zubkovn9823@rambler.ru

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ТОЧЕНИИ НЕЖЁСТКИХ ВАЛОВ**

**Chistoforova N.V., Zubkov N.V.**

### **STUDY OF DYNAMIC STABILITY OF A TECHNOLOGICAL SYSTEM WHEN TURNING NON-RIDIC SHAFTS**

**Аннотация.** В статье рассмотрен метод подавления регенеративных колебаний при точении нежестких валов, повышающий качество обработанной поверхности, стойкость инструмента, долговечность оборудования, эргономические показатели условий труда и производительность.

**Ключевые слова:** автоколебания, модуляция скорости резания, частота модуляции, точение валов.

**Abstract.** The article considers a method for suppressing regenerative vibrations when turning non-rigid shafts that improves the quality of the machined surface, tool life, equipment durability, ergonomic indicators of working conditions and productivity.

**Keyword:** self-oscillations, cutting speed modulation, modulation frequency, shaft turning.

Одними из наиболее трудоемких при изготовлении являются детали, обладающие малой жесткостью, особенно длинномерные валы. Ввиду малой жесткости обрабатываемого нежесткого вала технологическая система (ТС) станок-приспособление-инструмент-заготовка оказывается крайне податливой к действию внешних поперечных сил и динамических факторов, сопутствующих процессу резания.

В связи с этим обработка таких деталей связана со значительными трудностями, обусловленными деформацией обрабатываемой детали под действием усилия резания, а также возникновением вибрации детали в процессе обработки. Они бывают настолько интенсивными, что на практике вынуждают существенно снижать режимы резания, прибегать к многопроходной обработке, приводят к снижению стойкости и долговечности режущего инструмента. Возникновение вибрации крайне нежелательно на конечных чистовых этапах обработки, когда резание происходит на малых глубинах, и нарушение безвибрационного движения детали и резца в зоне резания может привести к браку детали.

Проблема возникновения вибраций актуальна при металлообработке на станках с ЧПУ, так как кроме снижения точности обработки, вибрации в зоне резания могут приводить к ускоренному износу оборудования станка.

В настоящее время обработка поверхности детали является следом движения режущей кромки инструмента в металле, однако в действительности движение инструмента и заготовки не соответствуют тем движениям, которые предусмотрены основной кинематической схемой станка. Вследствие данных несовпадений движений и возникает погрешность обработки, которую можно разложить на две части. Первая возникает перед началом резания из-за неточного позиционирования инструмента и заготовки, которое произошло в процессе настройки станка, либо при работе по промерам в процессе установки инструмента на стружку. Данная часть погрешности обработки называется погрешностью настройки станка. Она зависит от квалификации рабочего и от точности измерительных средств, с помощью которых производится настройка. Вторая часть погрешности обработки возникает во время процесса резания и определяется характеристиками станка, инструмента и обрабатываемой детали. Данная погрешность не зависит от действий рабочего при пользовании автоматическими подачами.

При обработке резанием поверхностные слои металла деформируются, и в них также образуются внутренние напряжения. Перераспределение внутренних напряжений приводит к деформации вала, что в основном отражается на кривизне его оси. Внутренние напряжения исчезают в течение длительного времени самопроизвольно, без внешнего воздействия, при этом также возникают деформации. Для предотвращения вредного влияния внутренних напряжений используют специальные термические операции, вводимые в технологический процесс.

Успех в решении комплексной научной проблемы, заключающейся в повышении точности и производительности токарной обработки нежестких валов, наряду с традиционными способами в значительной степени предопределяется наличием адекватных математических моделей, способных описать взаимосвязь колебаний упругой системы станка и динамического процесса резания.

После первых наблюдений Тейлора [1], Тлюсти [2], Тобиаса и Фишвика [3] регенеративный эффект был назван основной причиной автоколебаний.

Автоколебания в системе подразделяют на два основных вида: вынужденные и самовозбуждающиеся. Самовозбуждающиеся автоколебания в свою очередь подразделяются на первичные и вторичные. Первичные автоколебания определяются наличием физического явления в системе СПИД (станок – приспособление – инструмент – деталь), создающего механизм возбуждения колебаний. Проявляется как возникновение процессов трения инструмента о поверхность обрабатываемой заготовки во время врезания.

Вторичные автоколебания являются менее изученными, но в работах [4,5] доказано, что основную часть энергии (до 85%) в систему вносится благодаря регенеративному эффекту. Подробнее данный эффект был рассмотрен в работе

[5], в которой говорится о том, что он достигается вследствие возникновения вибрационного следа на поверхности резания, образующегося от предыдущего прохода зуба режущего инструмента или оборота заготовки. Именно таким образом происходит появление разницы в толщине срезаемого слоя, которая ведёт к притоку энергии в систему на поддержание автоколебаний. Из перечисленных работ известно, что ТС, независимо от своих начальных условий, подстраивает свои текущие колебания относительно вибрационного следа с опережением на четверть волны (сдвигом по фазе  $+90^\circ$ ). Данный сдвиг по фазе объясняется минимизацией энергетических затрат, идущих на поддержание колебательного процесса в ТС (рисунок 1).

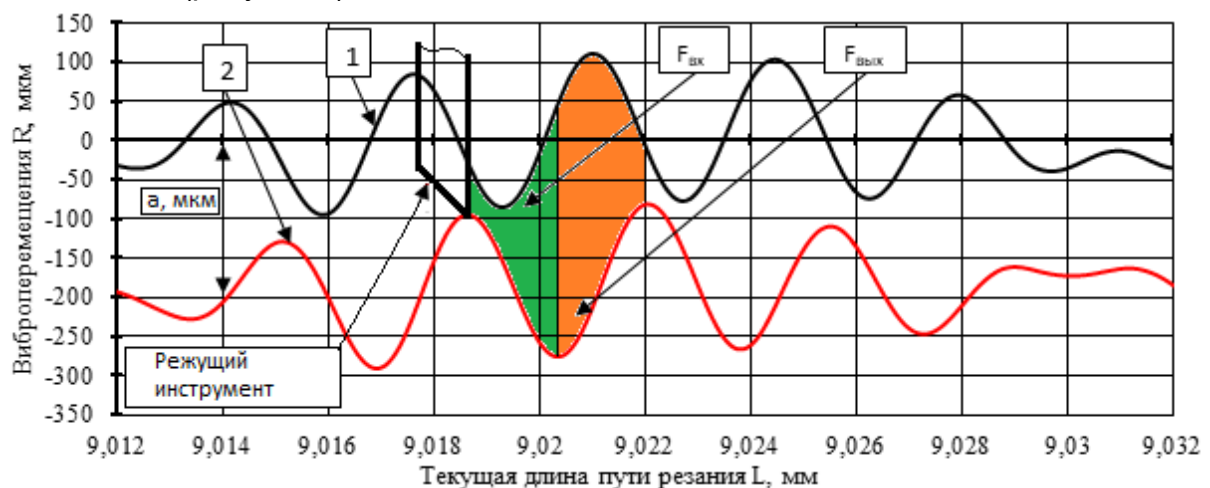


Рисунок 1 – Совмещенные траектории текущих автоколебаний и вибрационного следа при постоянной скорости резания: 1 – вибрационный след; 2 – текущие автоколебания

Получаемое фазовое смещение в системе приводит к неравномерности толщины срезаемого слоя, соответственно это оказывает влияние на силы резания. Таким образом, сила, затрачиваемая на движение инструмента от заготовки, оказывается большей, чем при врезании инструмента. Получаемая положительная разность сил резания и определяет получаемую ТС порцию энергии в течении каждого колебания. В первом приближении данную разность сил можно оценить разностью площадей срезаемого слоя в направлении скорости резания при выходе инструмента из заготовки и врезании в неё. Таким образом определяется источник энергии для осуществления регенерации автоколебаний.

Подавление источника регенерации автоколебаний может обеспечить модуляция скорости резания. Для этого необходимо выбрать правильные параметры модуляции: относительные частоту (RVF) и глубину (RVA).

Частоту модуляции (RVF) принято определять в относительном виде – количеством циклов изменения частоты вращения шпинделя за один оборот шпинделя.

Параметр относительной глубины модуляции (RVA) определяется отношением максимального приращения скорости резания за один цикл её изменения к среднему значению.

При модуляции скорости резания по гармоническому (или по любому другому) закону изменяется форма траектории относительного колебательного движения лезвия инструмента и заготовки. Она превращается в неравномерную, с последовательным чередованием растяжения и сжатия, которое характеризуется изменением длины пути резания соседних колебаний. Наиболее эффективной будет являться именно такая модуляция, при которой растянутые участки траектории текущих автоколебаний будут располагаться напротив сжатых участков траектории следа и наоборот. Для создания такого условия наилучшим значением RVF будет являться такое, которое равно или кратно половине количества зубьев инструмента.

Для анализа внутренней энергии колебаний при модуляции скорости резания учет значений фазового сдвига является неверным, поскольку колебания сравниваемых смежных траекторий имеют разную длину волны. Именно поэтому, в описываемом способе оценки применяется разность площадей сечения срезаемого слоя при выходе инструмента из заготовки и врезании в неё.

Поскольку деформация траекторий текущих колебаний технологической системы и следа сопровождается изменением относительного сдвига противоположных колебаний, значение относительного сдвига текущих колебаний системы также постоянно изменяется и не равно единому значению  $+90^{\circ}$ . Вследствие этого, разность площадей продольного сечения срезаемого слоя при выходе и врезании инструмента в заготовку каждый раз имеет разное значение и может быть, как положительным, так и отрицательным (рисунок 2).

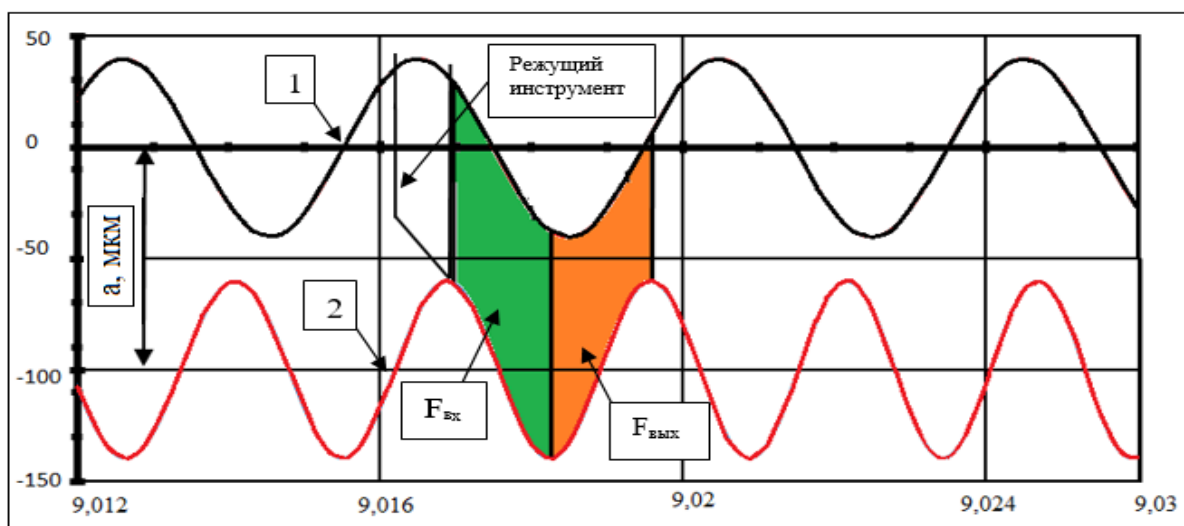


Рисунок 2 – Совмещенные траектории текущих автоколебаний и вибрационного следа при модулированной скорости резания: 1 – вибрационный след; 2 – текущие автоколебания

Положительное значение разности площадей говорит о внесении в систему энергии на поддержание регенеративного процесса автоколебаний. Отрицательное значение говорит о том, что из системы происходит отток энергии, т.е. процесс регенерации прекращается.

Параметр  $RVA$  напрямую влияет на подавление автоколебаний следующим образом. При относительно небольших значениях  $RVA$  суммарная разность площадей всех текущих колебаний ТС за цикл модуляции скорости резания имеет положительную величину, однако, меньшую чем при постоянной скорости резания, что говорит о снижении амплитуды автоколебаний в системе. При увеличении параметра  $RVA$  деформация смежных траекторий колебаний усиливается, суммарная разность площадей начинает приобретать отрицательный характер, что, как говорилось ранее, говорит об оттоке энергии из технологической системы и приводит либо к сильному снижению амплитуды автоколебаний, либо к её полному исчезновению.

Дальнейшее повышение параметра  $RVA$  приводит к последовательному увеличению и затем уменьшению положительной разности площадей сечения срезаемого слоя, и соответственно увеличению и уменьшению амплитуды автоколебаний.

В целом, повышение параметров модуляции скорости резания до определенных значений способствует устойчивому снижению амплитуды автоколебаний или даже её полному гашению, в случае, когда объем энергии, поступающей в ТС, сниженный благодаря модуляции скорости резания, меньше необходимого значения для поддержания автоколебаний в технологической системе. Такова физическая сущность способа оценки внутренней энергии автоколебаний.

В результате проведенного эксперимента с использованием модулированной скорости резания были получены данные, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты эксперимента

Номер опыта	$RVF$ , мод/об	$RVA$	Величина среднего размаха автоколебаний $R$ , мкм	Средняя амплитуда автоколебаний $A$ , мкм
1	2	3	4	5
1	0	0	500	20
2	0,1	0,025	120	1
3		0,05	450	14
4		0,075	320	8
5		0,1	260	6
6		0,125	300	10

1	2	3	4	5
7	0,1	0,15	320	7
8		0,175	90	0,8
9		0,2	160	5
10		0,25	150	3
11	0,2	0,02	800	25
12		0,04	300	4,5
13		0,08	550	10
14		0,1	650	16
15		0,15	800	17
16	0,5	0,005	750	25
17		0,01	700	23
18		0,015	900	30
19		0,02	850	22,5
20		0,025	810	20
21		0,03	180	1
22		0,04	170	0,8
23		0,05	160	0,5

В таблице собраны объединенные результаты трех серий проводимых опытов с переменной скоростью резания. Анализируя результаты, делаем вывод, что эффективной частотой модуляции для подавления автоколебаний является  $RVF=0,5$  мод/об. При её применении наблюдается успешное подавление автоколебаний на глубинах модуляции  $RVA=0,03, 0,04, 0,05$  в сравнении с другими значениями  $RVF$ , что также подтверждается в работах [4, 5].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Taylor F.** (1907) On the Art of Cutting Metals. Transactions ASME 28:231–248.
2. **Tlustý J., Poláček M.** (1957) Beispiele der Behandlung der selbsterregten Schwingung.
3. **Tobias S.A., Fishwick W.** (1958) Theory of Regenerative Machine Tool Chatter. The Engineer, 205.
4. **Свинин В.М.** Фрезерование с модулированной скоростью резания. ИД № 06506 от 26.12.2001, Иркутский государственный технический университет.
5. **Свинин В.М.** Выбор параметров модуляции скорости резания для гашения регенеративных автоколебаний. // Вестник СамГТУ, Серия «Технические науки». – 2006. – № 41 – с. 135-142.