

– реализация интерфейса на различных языках.

Практическим результатом научной исследовательской работы стал реализованный проект веб-приложения ИАС «Охрана

Труда» для МУП АГО «Ангарский Водоканал» на платформе ASP.Net Core. Веб-приложение было спроектировано с учетом современных теоретических и практических аспектов разработки веб-приложений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 12.4.011-89. Система стандартов безопасности труда. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200000277> (дата обращения: 01.10.2022).

2. ГОСТ 12.4.011-89. Российская система качества разработки приложений. Взамен ГОСТ Р 1.0-2004; введ. 2013-07-01 [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200102193> (дата обращения: 01.10.2022).

3. Соловьев, С.В. Технология разработки прикладного программного обеспечения [Текст]: учеб., пособие для вузов / С. В. Соловьев, Р. И. Цой, Л. С. Гринкруг // Тестирование и отладка. - 2011, - 231с.: ил.

3. Соловьев, С.В. Технология разработки прикладного программного обеспечения [Текст]: учеб., пособие для вузов / С. В. Соловьев, Р. И. Цой, Л. С. Гринкруг // Тестирование и отладка. - 2011, - 231с.: ил.

УДК 621.9.06-752

*к.т.н., доцент кафедры «Автоматизации технологических процессов и производств»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: ryabinak@mail.ru*

*магистрант кафедры «Автоматизации технологических процессов и производств»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: zubkovn9823@rambler.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ТОЧЕНИИ

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

STUDY OF REGENERATIVE VIBRATIONS IN TURNING

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.

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

В России и за рубежом в достаточной мере уделяется внимание совершенствованию машиностроения. Важное значение уделяется созданию автоматизированных процессов производства благодаря токарным, фрезерным сверлильным станкам, но все требует совершенства и доработки для улучшения качества поверхности детали.

В практике современного машиностроения широко применяется точение валов, обеспечивая высокую технологическую производительность при чистовой и черно-

вой обработке цилиндрических поверхностей. Однако во время работы на интенсивных режимах резания в технологической системе могут возбуждаться автоколебания, резко ухудшающие точность и качество обработанной поверхности, производительность, стойкость инструмента, себестоимость и долговечность оборудования. Таким образом, крайне важно обеспечить производство эффективным способом управления автоколебаниями с целью их подавления.

Одним из таких способов подавления автоколебаний является модуляция скорости резания. Данный способ позволяет подавлять автоколебания, возникающие при резании и негативно влияющие на качество получаемой поверхности. Эффективность использования этого способа определяется правильно подобранными частотой и глубиной модуляции скорости резания. Подбор этих параметров может выполняться экспериментальным путем, что весьма трудоемко, либо на основе имитационного моделирования на ЭВМ динамики процесса резания.

Причинами возникновения автоколебаний являются: вибрация соседнего оборудования; неточное изготовление узлов станка; нежесткость узлов станка и заготовки; наличие физического эффекта в системе СПИД; наличие регенеративного эффекта в системе.

Методы гашения автоколебаний: с помощью повышения демпфирования; с помощью применения переменного шага зубьев; с применением модуляции скорости резания. Метод модуляции скорости резания является одним из новых способов подавления автоколебаний. Но для разработки способа необходимо представление о механизме регенерации автоколебаний.

Целью данной работы является создание теоретического представления о физической сущности процесса регенерации автоколебаний. Установить влияние частоты вращения шпинделя на параметры регенеративных автоколебаний: амплитуду, частоту и фазу; опытным путем выявить влияние параметров модуляции скорости резания на механизм регенерации автоколебаний и дать физическое обоснование полученным результатам.

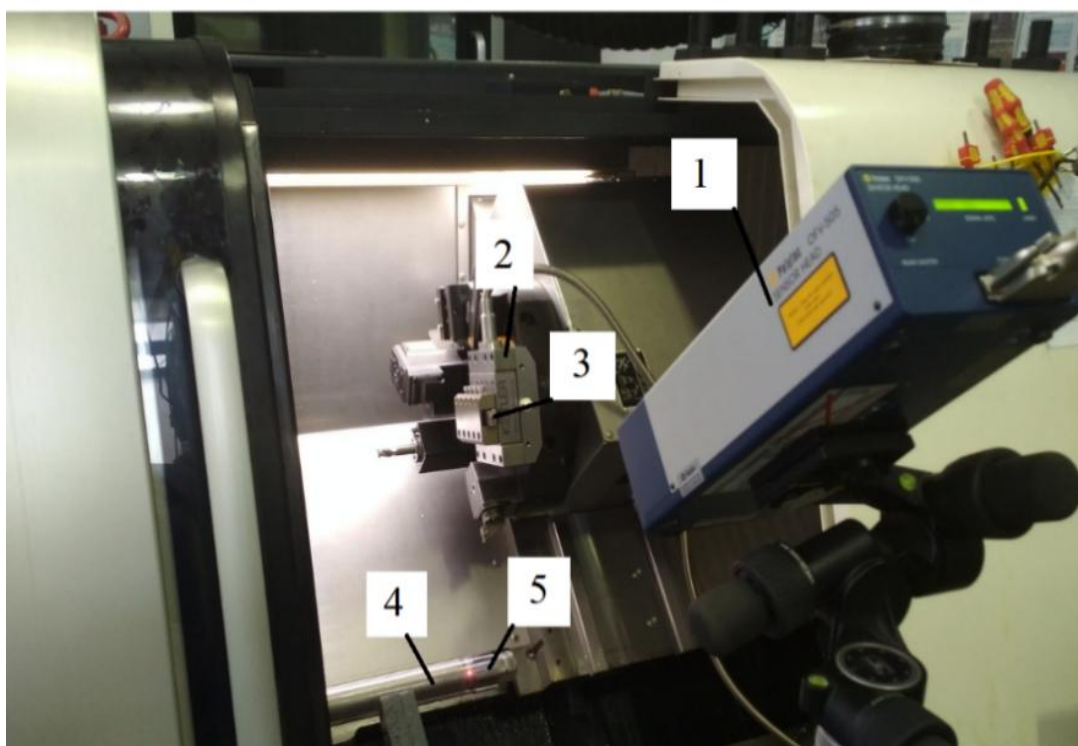


Рисунок 1 - Экспериментальная установка: 1 - лазерный виброметр Polytec OFV-505; 2 - динамометр Kistler Type 9129AA; 3 – закрепленный инструмент; 4 – заготовка, закрепленная в трехкулачковом патроне; 5 – лазерная фокусировка, установленная на заготовке.

Экспериментальное исследование проводили на токарном обрабатывающем центре DMG NEF 400, оснащённом стойкой ЧПУ Siemens 840D (рисунок 1). Измерение вибраций при проведении опытов проводилось при помощи вышеперечисленного оборудования, а именно оптического виброметра

«Polytec» состоящего из контроллера OFV-5000 и оптической сенсорной головки OFV 505.

Для получения данных были использованы сменные втулки, которые устанавливались на оснастку, описанную выше. Было произведено 7 резов на каждой втулке, всего

их было задействовано 3 при постоянной скорости резания на различных оборотах шпинделя. В ходе эксперимента были получены спектрограммы и вибро-граммы при постоянной и переменной скорости резания.

Для проведения эксперимента с постоянной скоростью резания был составлен план, приведенный в таблице 1. Ширина обрабатываемого пояса на втулке 9 мм.

Втулки проточить до диаметра 44 мм. Критический диаметр обработки: 40,5 мм, при данном диаметре в процессе обработки происходит задевание крепежной гайки.

Для измерения силы резания использовался трехкомпонентный динамометрический комплекс для токарных станков Kistler Type 9129AA.

Выбранный диапазон частот вращения шпинделя $n=997 - 1079$ об/мин, в этом диапазоне система имеет переход из стабильного состояния в нестабильное и обратно. Для проведения эксперимента были взяты частоты вращения шпинделя $n=1001 - 1074$ об/мин.

Для проведения эксперимента с переменной скоростью резания был составлен план, приведенный в таблице 2. Использовалось 8 втулок, которые обрабатывались на следующих режимах: частота вращения шпинделя $n=997$ об/мин, подача $F=0.143$ мм/об, глубина резания $a_p=1$ мм. Расстояние до сфокусированной точки лазера составляло 214 мм. Режимы модуляции скорости резания выбирались исходя из возможности обработки оборудования.

В ходе данного эксперимента были получены данные, которые были преобразованы в графики (см. рисунок 2).

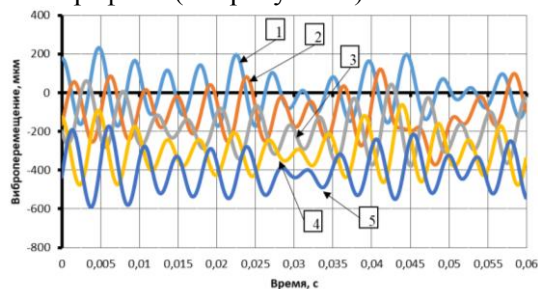


Рисунок 2 – Виброграмма колебаний заготовки, полученная при постоянной скорости резания, при $n=1001$ об/мин

1 – Первый оборот шпинделя; 2 – Второй оборот шпинделя; 3 – Третий оборот шпинделя; 4 – Четвертый оборот шпинделя; 5 – Пятый оборот шпинделя.

На рисунке 3 представлены спектрограммы автоколебаний заготовки при токарной обработке на различных скоростях оборота шпинделя. Здесь: ось абсцисс – частота автоколебаний заготовки, ось ординат – амплитуда.

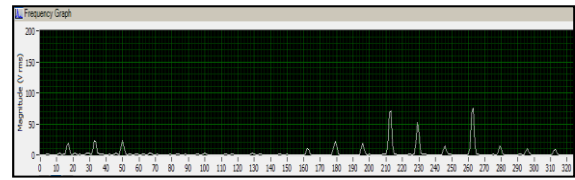


Рисунок 3 – Спектрограмма автоколебаний заготовки при резании, опыт №1 $n=1001$ об/мин

Также были получены графики сил, представленные на рисунке 4. Здесь: по оси абсцисс – время, а по оси ординат – силы во время резания.

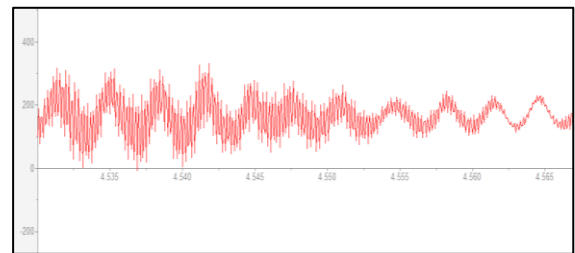


Рисунок 4 – Силы резания при токарной обработке с постоянной скоростью резания, опыт №1 $n=1001$ об/мин

Для анализа полученных сил при токарной обработке с постоянной скоростью резания была произведена выборка данных, так как в каждой серии проведенных экспериментов есть вероятность, что некоторые данные будут выбиваться из нужного диапазона, то есть иметь систематическую погрешность. Делая серию из трех экспериментов, в некоторых случаях удается исключить данную погрешность. Поэтому, объединяя результаты из трех серий, удается исключить дополнительные и случайные погрешности при проведении измерений.

Из экспериментально полученных графиков было выявлено негативное влияние автоколебаний на процесс точения и имеет место вышеописанное смещение $\varphi = +90^\circ$. Также во время обработки возникают критические силы, негативно влияющие на поверхность обработанной заготовки и на износ инструмента.

Таблица 1 - План проведения эксперимента с постоянной скоростью резания

№	Номер эксперимента	Дзаг, мм	n, об/мин	f мм/об	ар, мм
1	1	48,4	1001	0,143	1
2	2	48,4	1013		
3	3	47	1025		
4	4	47	1037		
5	5	47	1049		
6	6	47	1061		
7	7	47	1074		
8	8	48,4	1001		
9	9	48,4	1013		
10	10	48,4	1025		
11	11	47	1037		
12	12	47	1049		
13	13	48,4	1061		
14	14	48,4	1074		
15	15	48,4	1001		
16	16	47	1013		
17	17	48,4	1025		
18	18	48,4	1037		
19	19	47	1049		
20	20	47	1061		
21	21	48,4	1074		

На рисунках 5, 6 представлены зависимости изменения средней частоты автоколебаний и фазы от частоты вращения шпинделя во время обработки построенная исходя из выше представленных спектрограмм. Из полученных результатов можно сделать вывод, что с увеличением частоты вращения шпинделя происходит возрастающее изменение значений частоты автоколебаний и смещение фазы.

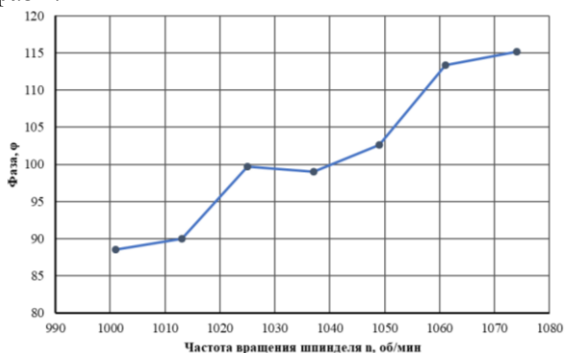


Рисунок 5 – Зависимость смещения фазы от частоты вращения шпинделя

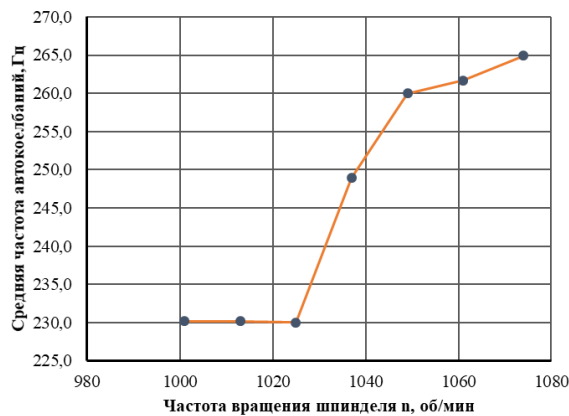


Рисунок 6 – Зависимость средней частоты автоколебаний от частоты вращения шпинделя

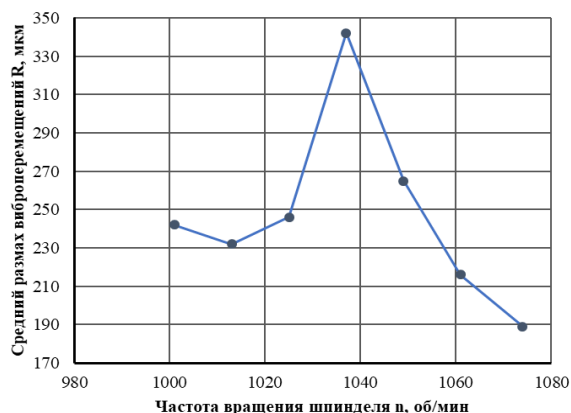


Рисунок 7 – Зависимость среднего размаха от частоты вращения шпинделя

На рисунках 7, 8 представлены зависимости среднего размаха и средней амплитуды автоколебаний от частоты вращения шпинделя. На основе полученных результатов видно, что при частотах вращения шпинделя равным n=1037 об/мин, наблюдаются максимальные значения по амплитуде и фазе. Исходя из графика зависимости фазы и частоты автоколебаний можно сделать вывод, что при изменении фазы на различных частотах вращения шпинделя также меняются и амплитуды виброперемещений и автоколебаний. Данную зависимость можно объяснить переходом из зоны стабильного резания в нестабильную.

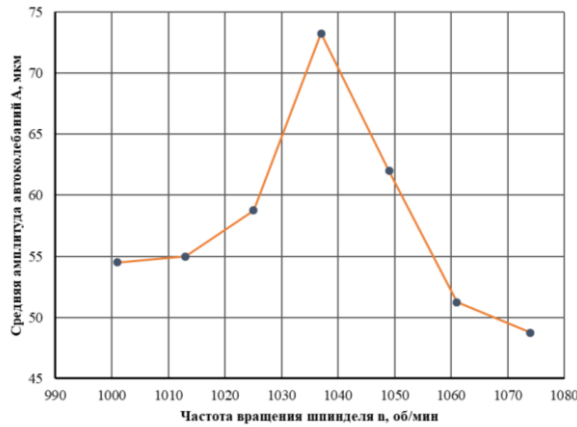


Рисунок 8 – Зависимость средней амплитуды автоколебаний от частоты вращения шпинделя

Из полученных данных можно сделать вывод, что для постоянной скорости резания лучшими показателями по всем рассматриваемым зависимостям от частоты вращения

шпинделя являются частоты равные $n=1025$ об/мин. Можно сделать вывод, что это говорит о прямой зависимости смещения фазы, амплитуды и размаха от частоты вращения шпинделя, такую же зависимость между собой имеют графики изменения силы и частоты автоколебаний от частоты вращения шпинделя.

В ходе эксперимента с модулированной скоростью резания были получены данные, которые были преобразованы в графики (см. рисунки 9-11.)

Запись радиальной силы не удалась, так как значения выходят за диапазон рабочих показаний оборудования, вследствие чего динамометр переходит в состояние перекалибровки и гасит весь сигнал, поэтому дальше анализировали размахи и амплитуды автоколебаний.

Таблица 2 – План проведения эксперимента с переменной скоростью резания

№ эксперимента	Dзаг, мм	RVF, мод/об	RVA	n, об/мин	f, мм/об	ap, мм
1	48	0	0	997	0,143	1
2	48	0,1	0,025			
3	48		0,05			
4	48		0,075			
5	48		0,1			
6	48		0,125			
7	48		0,15			
8	48		0,175			
9	48		0,2			
10	48		0,25			
11	48		0,2			
12	48	0,04				
13	48	0,08				
14	48	0,1				
15	48	0,15				
16	39	0,5	0,005			
17	39		0,01			
18	39		0,015			
19	43,5		0,02			
20	39		0,025			
21	43,5		0,03			
22	43,5		0,04			
23	48		0,05			

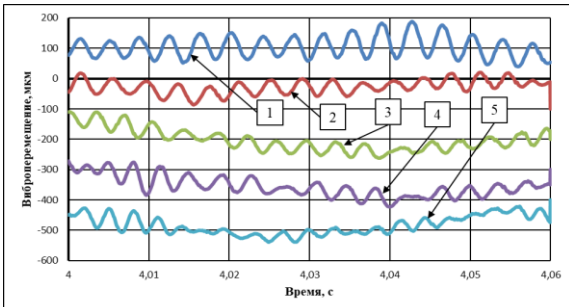


Рисунок 9 – Виброграмма колебаний заготовки, полученная при точении с модулированной скоростью резания, при $RVF=0,1$ мод/об, $RVA=0,2$

1 – Первый оборот шпинделя; 2 – Второй оборот шпинделя; 3 – Третий оборот шпинделя; 4 – Четвертый оборот шпинделя; 5 – Пятый оборот шпинделя.

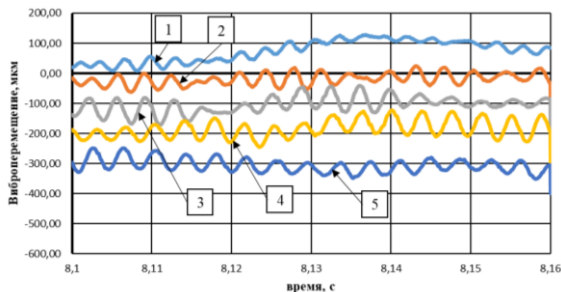


Рисунок 10 – Виброграмма колебаний заготовки, полученная при точении с модулированной скоростью резания, при $RVF=0,2$ мод/об, $RVA=0,15$

1 – Первый оборот шпинделя; 2 – Второй оборот шпинделя; 3 – Третий оборот шпинделя; 4 – Четвертый оборот шпинделя; 5 – Пятый оборот шпинделя.

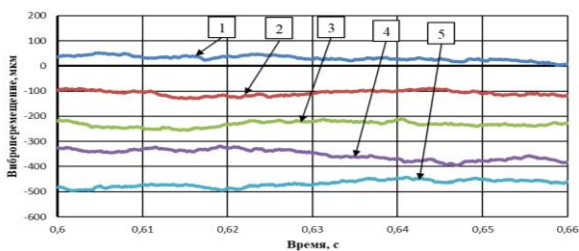


Рисунок 11 – Виброграмма колебаний заготовки, полученная при точении с модулированной скоростью резания, при $RVF=0,5$ мод/об, $RVA=0,03$

1 – Первый оборот шпинделя; 2 – Второй оборот шпинделя; 3 – Третий оборот шпинделя; 4 – Четвертый оборот шпинделя; 5 – Пятый оборот шпинделя.

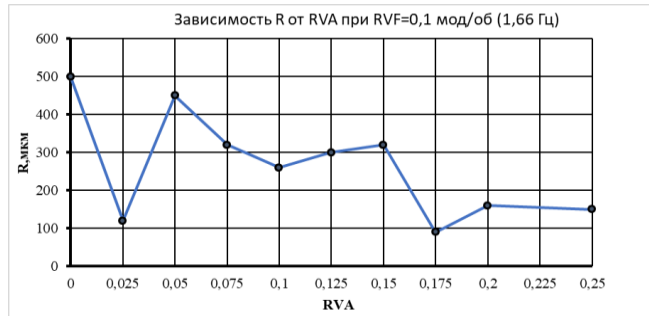


Рисунок 12 – Зависимость размаха от RVA , при $RVF=0,1$ мод/об (1,66 Гц)

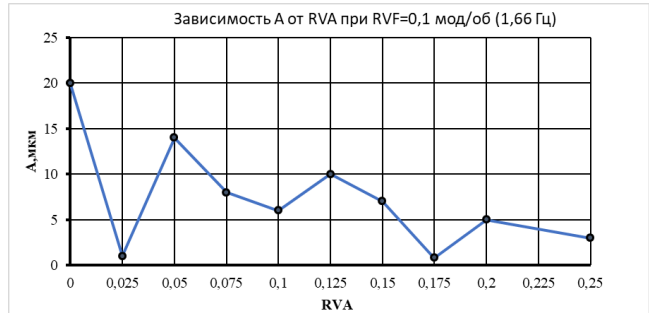


Рисунок 13 – Зависимость амплитуды от RVA , при $RVF=0,1$ мод/об (1,66 Гц)

На рисунках 12, 13 представлены изменения средней амплитуды автоколебаний и среднего размаха в зависимости от различных значений RVA , при $RVF=0,1$ мод/об. Размах виброперемещений и амплитуда автоколебаний имеют минимальные значения при $RVA=0,025\%$, а максимальные при значениях $RVA=0,05\%$, следовательно, сначала в системе происходит подавление автоколебаний, а при увеличении значения RVA вновь возрастает и в дальнейшем имеет по-степенно затухающий характер.

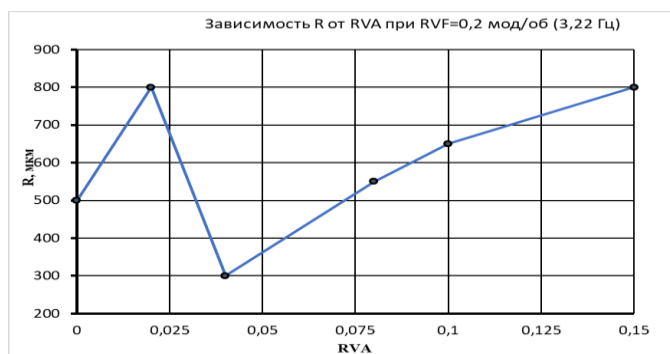


Рисунок 14 – Зависимость размаха от RVA , при $RVF=0,2$ мод/об (3,22 Гц)

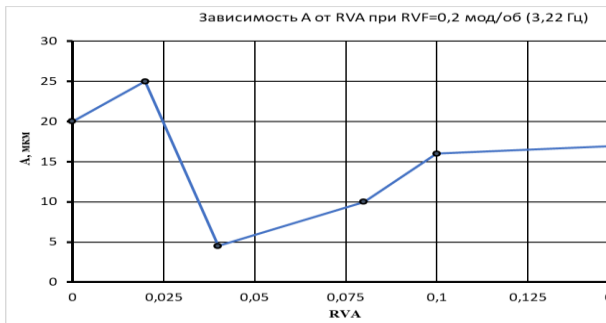


Рисунок 15 – Зависимость амплитуды от RVA, при RVF=0,2 мод/об (3,22 Гц)

На рисунках 14, 15 представлены изменения средней амплитуды автоколебаний и среднего размаха в зависимости от различных значений RVA, при RVF=0,2 мод/об. Размах виброперемещений и амплитуда автоколебаний имеют изначально нарастающий характер по мере приближения к значению RVA=0,025%, а далее при увеличении данного параметра в системе замечается максимальное подавление автоколебаний и виброперемещений, а затем значения вновь возрастают.

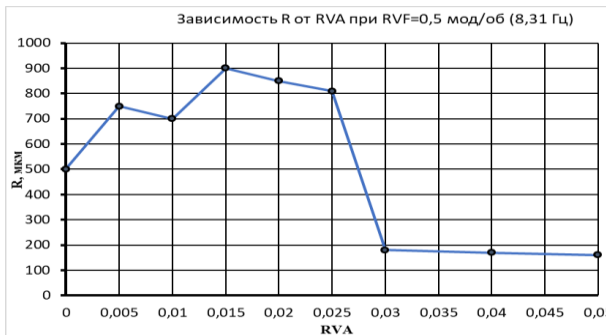


Рисунок 16 – Зависимость размаха от RVA, при RVF=0,5 мод/об (8,31 Гц)

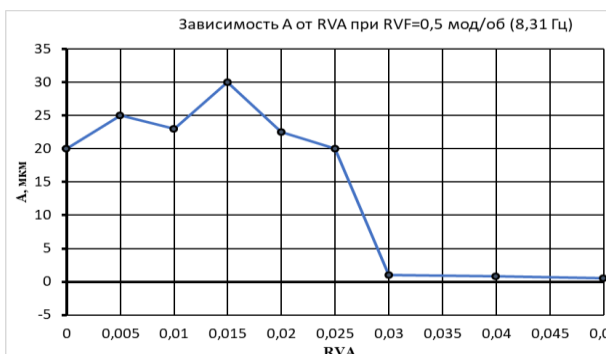


Рисунок 17 – Зависимость амплитуды от RVA, при RVF=0,5 мод/об (8,31 Гц)

На рисунках 16, 17 представлены изменения средней амплитуды автоколебаний и среднего размаха в зависимости от различ-

ных значений RVA, при RVF=0,5 мод/об. Здесь минимальные значения автоколебаний и виброперемещений формируются при значении RVA=0,03; 0,04; 0,05%, что является наилучшим результатом подавления автоколебаний и виброперемещений из выше представленных вариантов RVF.

Доказано опережение вибрационного следа на поверхности резания по фазе на четверть волны. Это создает условия свободной регенерации автоколебаний, когда им не нужно подстраиваться к следу. Тогда амплитуда автоколебаний принимает максимально возможное значение, а их частота без учета демпфирования определяется собственной жесткостью токарного станка и жесткостью резания. В условиях нашего исследования этому случаю примерно соответствует частота вращения шпинделя 1037 об/мин.

С повышением или уменьшением частоты вращения шпинделя происходит увеличение или уменьшение фазового сдвига, вследствие чего происходит соответствующее изменение частоты, что приводит к снижению амплитуды автоколебаний.

При использовании модуляции по какому-либо закону, например, гармоническому, изменяется форма траектории относительного колебательного движения лезвия инструмента и заготовки. Из равномерной, при постоянной скорости резания, она преобразуется в неравномерную в течение цикла модуляции скорости с последовательным чередованием её постепенного нарастающего-убывающего растяжения и сжатия, характеризующегося изменением длины пути резания соседних колебаний. Наиболее эффективной для подавления автоколебаний является модуляция, при которой растянутые участки траектории текущих автоколебаний располагаются напротив сжатых участков траектории следа и наоборот. Этому условию отвечает значение RVF, равное половине количества зубьев инструмента.

В результате выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Литературный обзор показал, что одним из наиболее перспективных способов подавления автоколебаний при точении нежестких деталей является применение модуляции скорости резания,

2. Экспериментальным путем установлено, что при точении с постоянной скоростью резания нежестких деталей амплитуда, частота и фаза автоколебаний зависят от час-

тоты вращения шпинделя. В пределах каждой лепестковой зоны диаграммы динамической устойчивости частота и фаза автоколебаний непрерывно увеличиваются с ростом скорости резания, а их амплитуда максимальна при частоте вращения шпинделя, соответствующей условиям свободной регенерации (фазе $+90^\circ$).

3. Опыты показали, что модуляция скорости резания способствует подавлению автоколебаний. При выбранном значении частоты модуляции с увеличением её глуби-

ны происходит последовательное периодическое снижение и возрастание амплитуды автоколебаний. Это позволяет на практике опытным путем найти сочетание параметров модуляции скорости резания для практически полного гашения автоколебаний.

4. Результаты опытов позволили дать теоретическое объяснение механизма регенерации автоколебаний при резании с постоянной и модулированной скоростью, что создает основу для разработки эффективных приемов гашения автоколебаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Taylor F** (1907) On the Art of Cutting Metals. Transactions ASME 28:231–248.

2. **Plusty J, Polacek M** (1957) Besipiele der behandlung der selbster-regten Schwingung.

3. **Tobias SA, Fishwick W** (1958) Theory of Regenerative Machine Tool Chatter. The Engineer 205.

4. **Амосов И.С.** Осциллографическое исследование вибраций при резании металлов / И.С. Амосов // Точность механической обработки и пути ее повышения: сб. научн. тр. – М. –Л. Машгиз, 1951. свинин

5. **Свинин В.М.** Фрезерование с модулированной скоростью резания ИД № 06506 от 26.12.2001 Иркутский государственный технический университет 664074, Иркутск, ул Лермонтова, 83.

6. **Свинин В.М.** Выбор параметров

модуляции скорости резания для гашения регенеративных автоколебаний. //Вестник СамГТУ, Серия «Технические науки». – 2006. – № 41 – с. 135-142

7. **Quintana G, Ciurana J.** Chatter in machining processes: a review // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2011. Vol. 51. P. 363–376. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2011.01.001

8. **Gabor Stepan, Adam K. Kiss, Behnam Ghalamchi, Jussi Sopanen, Daniel Bachrethy** Chatter avoidance in cutting highly flexible workpieces // CRIP Annals – Manufacturing Technology 66 (2017) 337-380.

9. **Эльясберг М.Е.** Автоколебания металлорежущих станков: Теория и практика. СПб.: ОКБ станкостроения. 1993. 180 с.