

На правах рукописи

Иванов Илья Игоревич

**Исследование динамики процесса вибрационного сверления с
управлением**

Специальность:

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель: доктор технических наук Воронов Сергей Александрович

Официальные оппоненты: **Асташев Владимир Константинович**, доктор технических наук, главный научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук» (ИМАШ РАН)

Лукьянов Александр Дмитриевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Автоматизация производственных процессов», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ).

Защита состоится 19 декабря 2018 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета Д 212.141.03 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5, стр. 1.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан « » октября 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук

Мурашов

Мурашов М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Глубокое сверление – технологическая операция, широко используемая в авиакосмической, автомобильной, металлургической и энергетической отраслях машиностроения.

Одна из наиболее остро стоящих проблем при сверлении труднообрабатываемых металлов и сплавов – образование сливной металлической стружки, которая забивает канавки в инструменте, препятствуя отводу материала из зоны резания. При этом повышается температура в зоне резания, ускоряя износ режущей части сверла, повышается величина крутящего момента на сверле, приводя к возможному заклиниванию или поломке инструмента. Названные причины обуславливают целесообразность дробления стружки в процессе сверления. Дробленая стружка легко удаляется из отверстия, не снижая производительность обработки и стойкость инструмента.

Возможным способом обеспечения сегментации стружки является применение технологии вибрационного резания, суть которого состоит в колебательном перемещении инструмента, сопровождающем главное движение резания и движение подачи. При сверлении данное перемещение осуществляется в направлении оси вращения. Если закон движения режущей части инструмента удовлетворяет определенным амплитудно-фазовым соотношениям (В.Н. Подураев), режущие кромки временно выходят из материала, что приводит к формированию сегментированной стружки. Помимо дробления стружки, полезными следствиями вибраций при сверлении являются уменьшение температуры в зоне резания, возможное повышение производительности обработки и стойкости инструмента, улучшение качества получаемого отверстия.

Таким образом, **актуальна** задача разработки методов поддержания полезных колебаний инструмента, обеспечивающих дробление стружки.

Степень разработанности темы. В настоящее время реализованы гидравлический, кинематический, электромагнитный и некоторые другие способы задания колебательного перемещения инструмента. Все они предполагают существенное изменение конструкции станка, что не всегда экономически целесообразно. По этой причине в настоящее время вибрационное резание не находит широкого применения.

Помимо устройств, жестко задающих вибрации сверла, существуют специальные вибропатроны (Гуськов А.М), устанавливаемые на стандартный шпиндель станка и обеспечивающие вибрации за счет энергии главного движения резания. Такие устройства используют автоколебательный принцип работы, то есть перекачивают энергию главного движения в энергию колебаний.

Особенностью конструкции вибропатрона является наличие упругого элемента, податливого в осевом направлении и позволяющего подвижной части вибропатрона, в которую крепится сверло, совершать

дополнительные колебания с частотой и амплитудой, обеспечивающими дробление стружки. Осевая жесткость данного упругого элемента подбирается из условий самовозбуждения автоколебаний системы «упругая система – рабочий процесс», включающей подвижную часть вибропатрона, инструмент, упругий элемент и процесс резания, обуславливающий осевую силу резания. Моделированию динамики описанной системы и определению условий самовозбуждения осевых вибраций посвящен ряд работ А.М. Гуськова, С.А. Воронова, Н. Paris, G. Moraru и других.

Недостатком таких автоколебательных устройств является сильная зависимость условий самовозбуждения колебаний от параметров диссипации вибрационной энергии, которые, в свою очередь, трудно идентифицируемы в процессе обработки и изменяются при износе инструмента. Поэтому для обеспечения гарантированного дробления стружки, помимо энергии главного движения, целесообразно подводить внешнее возбуждающее воздействие, определяемое системой управления с обратной связью. Вибропатрон, дополненный системой управления, должен обеспечивать требуемые вибрационные режимы при значительном разбросе параметров диссипации энергии.

Образцы конструкции вибропатронов, включающих устройства для возбуждения осевых колебаний сверла, к настоящему моменту разработаны (G. Moraru). Предложены некоторые алгоритмы управления подобными устройствами, в том числе – адаптивные, с целью обеспечения дробления стружки (А.М. Гуськов). Однако на данный момент не представлено всеобъемлющего исследования этих алгоритмов для широкого диапазона параметров обработки и свойств материала, а также нет экспериментальных установок, демонстрирующих возможности обеспечения режима вибрационного резания за счет управляющего воздействия.

Целью диссертационной работы является создание научных основ и инstrumentальных средств проектирования технологии вибрационного сверления с адаптивным управлением, которое за счет дробления стружки обеспечивает повышение производительности обработки и стойкости инструмента.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

- 1) исследование динамики управляемого процесса вибрационного сверления для различных предложенных алгоритмов управления на основе математической модели замкнутой системы «упругая система-рабочий процесс-система управления»;
- 2) разработка нового алгоритма адаптивного управления динамикой процесса вибрационного сверления и сравнение с существующими;
- 3) разработка и исследование методики обеспечения сегментации стружки при вибрационном сверлении, основанной на наилучшем из сравниваемых алгоритмов управления;
- 4) создание стенда и экспериментальная апробация нового алгоритма управления вибрационным сверлением.

Научная новизна

- установлены закономерности совместного влияния параметров обработки и параметров различных законов управления на интегральные характеристики процесса вибрационного сверления;
- предложен новый закон адаптивного управления динамикой процесса вибрационного сверления, обеспечивающий выполнение цели управления в более широком диапазоне параметров обработки, чем ранее используемые законы;
- выполнено исследование динамики процесса вибрационного сверления с управлением, учитывающая квантование сигнала при аналого-цифровом преобразовании, дискретный характер коэффициента обратной связи, задаваемого контроллером, и запаздывание, обусловленное временем вычислений контроллера; на базе исследования возможно назначение требований к аппаратной части системы управления;
- разработана расширенная математическая модель динамики управляемого процесса вибрационного сверления, включающая закон адаптации целевого размаха колебаний, установившееся значение которого обеспечивает рациональные условия дробления стружки.

Практическая значимость работы заключается в следующих результатах:

- разработан пакет программ в комплексе MATLAB для моделирования динамики процесса вибрационного сверления с учетом дискретизации сигнала по уровню и по времени и с возможностью подключения различных алгоритмов управления;
- предложена методика расчета режимов обработки и параметров системы управления, обеспечивающих рациональные режимы вибрационного сверления;
- разработана адаптивная система управления вибрациями, обеспечивающая целевой размах колебаний;
- создан экспериментальный стенд для вибросверления, включающий технологическую систему, упругую систему и систему управления, позволяющий верифицировать различные стратегии управления.

Методологическую основу исследования составляют методы теории колебаний и динамической устойчивости механических систем. Для решения поставленных задач в работе используются численное решение уравнений модели исследуемой системы, многовариантное моделирование динамики системы с целью идентификации и обобщения её свойств, экспериментальные методы проверки результатов.

Положения, выносимые на защиту:

- закономерности, определяющие зависимость интегральных характеристик процесса вибрационного сверления от параметров обработки и параметров различных управления для различных используемых законов;
- закон управления процессом вибрационного сверления, обеспечивающий требуемый для дробления стружки размах колебаний;

- результаты численного моделирования динамики процесса вибрационного сверления с адаптивным управлением, учитывая квантование сигнала в цепи обратной связи, дискретный характер коэффициента обратной связи и запаздывание в контуре адаптации;
- методика проектирования рациональных режимов вибросверления с управлением, обеспечивающих условия надежного дробления стружки.

Достоверность результатов обоснована: применением классических подходов к исследованию нелинейной динамики машин и надёжных методов численного решения уравнений модели; использованием в методике расчета верифицированной феноменологической модели осевой силы резания при сверлении; результатами экспериментальных исследований, подтверждающих точность используемой математической модели и работоспособность разработанной системы управления.

Апробация результатов исследования

По теме настоящего исследования сделаны доклады на следующих конференциях: 25 Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов МИКМУС-2013 (Москва, 2013); Международная научно-техническая конференция «Аэрокосмические технологии» (Москва, 2014); 27 Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов МИКМУС-2015 (Москва, 2015); Научный семинар кафедры прикладной механики МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2018); Международная научно-техническая конференция «Пром-инжиниринг» (Москва, 2018); Межкафедральный семинар по прикладной и теоретической механике и численным методам моделирования МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2018); Международная научно-техническая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2018» (Севастополь, 2018 г.); Международная научно-техническая конференция «Динамика технических систем» (Ростов-на-Дону, 2018 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ, из них 6 в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов исследований и 4 статьи в зарубежных научных изданиях, входящих в перечни Scopus и Web of Science. Оформлено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи научного исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приведен обзор и анализ литературы, посвященной вопросу поддержания полезных колебаний инструмента, обеспечивающих дробление стружки.

Периодический выход режущих кромок из материала в зоне резания возможен при определённых условиях, накладываемых на закон колебательного движения инструмента. В.Н. Подураев показал, что в случае

гармонических колебаний условие дробления стружки математически может быть записано следующим образом:

$$A \geq \frac{a}{\sin(\pi i)} \quad (1)$$

где A – размах колебаний режущей части инструмента, мм; a – подача на режущую кромку, мм; i – дробная часть количества колебаний, совершаемых инструментом при повороте на одну режущую кромку.

Существуют различные способы сообщения инструменту требуемого колебательного перемещения за счет внешнего возбуждения: кинематический, гидравлический, электромагнитный (В.Н. Подураев, G. Peigne) и другие способы. Общей проблемой перечисленных способов возбуждения вибраций является необходимость изменения конструкции станка из-за добавления специального вибровозбудителя. Кроме того, в существующих конструкциях затруднительно регулировать амплитуду и частоту колебаний инструмента.

Альтернативой устройствам, жестко задающим закон осевого колебательного движения сверла, являются вибропатроны (А.М. Гуськов), обеспечивающие самовозбуждение вибраций. В этом случае за счет особенностей рабочего процесса возможна перекачка энергии главного движения в энергию колебаний подвижной части патрона. Самовозбуждение автоколебаний происходит через бифуркацию Пуанкаре-Андронова-Хопфа за счет регенеративного эффекта (S.A. Tobias, J. Tlusty), при котором переменная сила резания, возникающая при колебательном перемещении режущей части инструмента по волнистой поверхности, образованной на предыдущем проходе, совершает положительную работу, раскачивая колебания сверла.

Вибропатрон включает специальный упругий элемент, передающий осевую силу и позволяющий сверлу совершать достаточные для надёжного дробления стружки осевые перемещения. Закон движения подвижной части вибропатрона является не жестко заданной функцией, а функцией состояния колебательной системы. Параметры упругого элемента должны выбираться исходя из условий возбуждения автоколебаний, амплитуда и частота которых удовлетворяет неравенству (1). При этом вибропатрон должен жестко передавать крутящий и изгибающие моменты, а также поперечные силы.

Условия самовозбуждения колебаний могут быть графически представлены диаграммой устойчивости (см. Рис. 1,*а*). При переходе в плоскость параметров «частота вращения – жесткость упругого элемента» вид диаграммы изменяется (см. Рис. 1,*б*). На диаграмме (Рис. 1,*а*) можно выделить устойчивую область, в которой автоколебания не возбуждаются, и неустойчивую область, в которой происходит самовозбуждение колебаний, и возможно дробление стружки.

Диаграмма устойчивости дает представление лишь об областях плоскости системных параметров, в которых возбуждаются автоколебания, однако не дает информации об интенсивности развивающегося колебательного процесса. Более полное представление о динамическом поведении системы дают интегральные характеристики вибрационного процесса: размах колебаний A и коэффициент непрерывности резания ψ . Последний введен А.М. Гуськовым и определяется как отношение времени работы инструмента в материале к полному времени работы. Если данный коэффициент равен 1, это значит, что инструмент не выходит из материала, и стружка не дробится. Если $\psi << 1$, то стружка дробится, но вибрации избыточны. Желаемые значения коэффициента ψ должны быть близкими, но меньшими 1, то есть находиться в диапазоне 0,8...0,9.

Полное исследование свойств семейства возможных колебательных процессов возможно на основе многовариантного нелинейного моделирования динамики системы. Такое исследование, включающее построение зависимостей размаха колебаний и коэффициента непрерывности от жесткости упругого элемента и частоты вращения, было выполнено в работах А.М. Гуськова, С.А. Воронова, S. Tichkiewitch, H. Paris, G. Peigne, G. Moraru и других. В работах H. Paris, N. Guibert, J. Rech дано развитие модели вибрационного сверления в части модели сил резания в районе перемычки сверла. Исследования динамики вибрационного сверления с учетом динамической податливости сверла и шпинделя выполнены в работах И.А. Киселева, А.М. Гуськова, С.А. Воронова, F. Forestier, S. Mousavi.

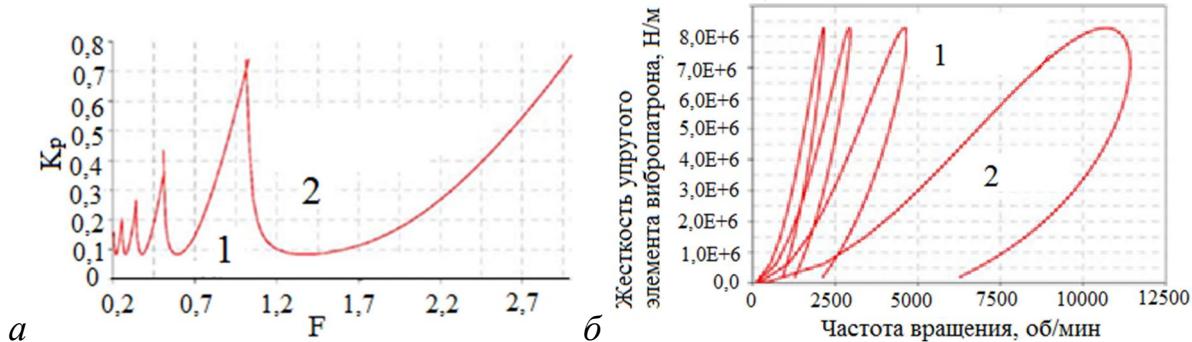


Рис. 1. Диаграммы устойчивости в плоскости безразмерных (а) и размерных (б) параметров обработки

F – отношение частоты прохождения режущих кромок инструмента к собственной частоте вибропатрона, K_p – отношение касательной жесткости резания к жесткости упругого элемента вибропатрона, 1 – зона обычного сверления, 2 – зона вибрационного сверления.

Несмотря на рост точности моделей динамики вибрационного сверления надежность обеспечения вибрационных режимов с требуемыми характеристиками остается невысокой. Это связано с нестабильностью диссипации энергии в зоне резания, особенно в районе перемычки, а также с изменением диаграммы устойчивости по мере износа сверла. Кроме того, величина амплитуды колебаний плохо контролируется в режиме

самовозбуждения вибраций. Поэтому регенеративный механизм подкачки энергии в колебательную систему целесообразно дополнить внешним управляющим воздействием, определяемым в цепи обратной связи. Желательно, чтобы данное воздействие могло обеспечивать подвод энергии в колебательную систему в случае, если колебания не самовозбуждаются, и отвод энергии из системы в случае, если колебания избыточны, и необходимо предотвратить ускоренные износ и усталостное разрушение инструмента. Данному критерию удовлетворяют адаптивные алгоритмы управления, обеспечивающие изменение коэффициента обратной связи в зависимости от текущего значения целевого функционала.

Исследование динамики вибрационного сверления с внешним возбуждением по гармоническому закону выполнено в работах А.М. Гуськова, С.А. Воронова. Однако данный способ не включает обратной связи по интегральным характеристикам вибрационного процесса, то есть не способен поддерживать требуемый вибрационный процесс при изменении параметров диссипации в системе. А.М. Гуськов предложил алгоритм управления с обратной связью по скорости, коэффициент обратной связи адаптируется по коэффициенту ψ . Данный закон адаптации позволяет обеспечивать требуемый коэффициент непрерывности ψ , однако, как было показано в последующих работах, может приводить к неустойчивому динамическому поведению системы «упругая система-рабочий процесс-система управления».

Таким образом, на настоящий момент не предложено стратегии адаптивного управления динамикой вибрационного сверления, надежно обеспечивающей вибрационный процесс с требуемыми характеристиками дробления стружки. Кроме того, отсутствуют эксперименты по применению разработанных стратегий управления к процессу вибрационного сверления.

Во второй главе описывается математическая модель замкнутой системы «упругая система-рабочий процесс-система управления» для процесса вибросверления, приводится исследование ее динамического поведения в случае применения предложенных ранее стратегий управления, а также предлагается и исследуется новая стратегия управления динамикой вибрационного сверления.

Расчетная схема динамики процесса вибрационного сверления для случая силового возбуждения представлена на Рис. 2. Система «вибропатрон-сверло» здесь моделируется одностепенной колебательной системой, так как осевая податливость упругого элемента существенно превышает другие податливости рассматриваемой системы, а собственная частота продольных колебаний подвижной части вибропатрона и сверла на упругом элементе значительно ниже собственных частот изгибных и крутильных колебаний сверла.

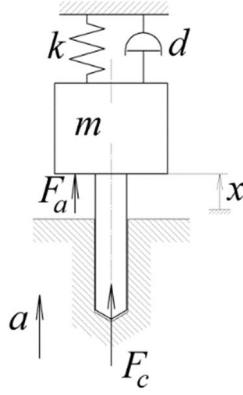


Рис. 2. Расчетная схема динамики процесса вибрационного сверления с управлением для случая силового способа возбуждения

Система уравнений математической модели:

$$m \ddot{x} + d \dot{x} + kx = F_c + F_a \quad (2)$$

$$F_c = K_c h^r \quad (3)$$

$$h = (s(t - T) + a - x(t)) H(s(t - T) + a - x(t)) \quad (4)$$

$$s(t) = s(t - T) + a - h(t) \quad (5)$$

где m – модальная масса подвижной части вибропатрона, учитывающая инерцию упругого элемента, т; x – координата подвижной части вибропатрона, мм; d – коэффициент вязкости закрепления подвижной части вибропатрона, Н·с/мм; k – жесткость упругого элемента, Н/мм; F_c – осевая сила резания, Н; F_a – сила актуатора, Н; K_c , r – эмпирические константы закона сил резания, зависящие от обрабатываемого материала и геометрической формы режущей части инструмента; h – толщина срезаемого слоя, мм; s – осевая координата произвольной точки профиля режущей части инструмента, мм; T – период прохождения режущих кромок ($T = 2\pi/(z\Omega)$, где Ω – частота вращения, рад/с, z – количество режущих кромок), с; $H(\dots)$ – функция Хэвисайда

Система уравнений (2)–(5) – нелинейная с запаздывающим аргументом, входящим в конечные уравнения (4), (5) и решается численно с итерациями на каждом временном шаге. Безразмерное время вводится следующим образом: $\tau = t/T$. Результаты моделирования представлены через следующие безразмерные величины: безразмерное перемещение $q = x/a$; безразмерные силы резания (c) и актуатора (a): $P_{c,a} = F_{c,a} / (K_c a^r)$.

Основные безразмерные параметры, определяющие динамическое поведение системы:

– отношение собственной частоты подвижной части вибропатрона к частоте прохождения режущих кромок ($z\Omega$):

$$p = \sqrt{k/m} / z\Omega \quad (6)$$

– безразмерный коэффициент демпфирования: $\zeta = \frac{d}{2\sqrt{km}}$

– безразмерная жесткость резания:

$$k_c = \frac{K_c}{k a^{1-r}} \quad (7)$$

Все расчеты проводятся при безразмерном коэффициенте демпфирования $\zeta = 0,1$. Примеры зависимостей безразмерных перемещений и сил резания от времени при отсутствии управления для случаев отсутствия и наличия самовозбуждения автоколебаний представлены соответственно на Рис. 3 и 4. Видно, что в случае возбуждения автоколебаний сила резания (Рис. 4) периодически обращается в ноль, что означает дробление стружки.

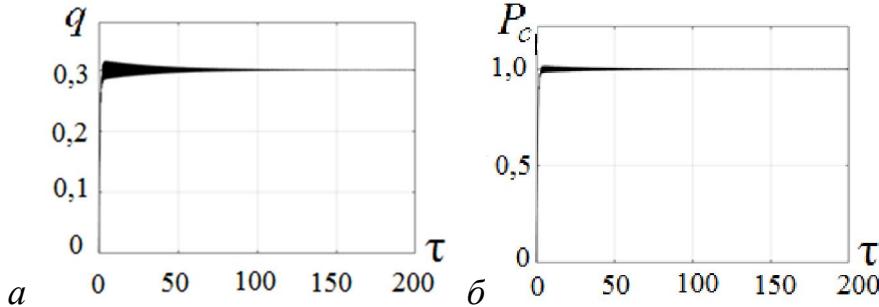


Рис. 3. Зависимости от времени безразмерного перемещения (а) и безразмерной силы резания (б) при $k_c=0,3$ и $p=1,5$ при выключенном управлении

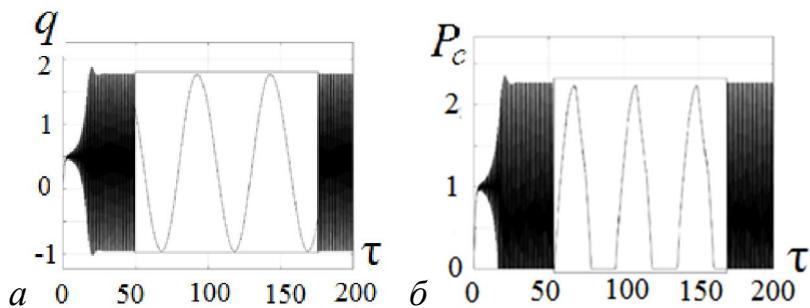


Рис. 4. Зависимости от времени безразмерного перемещения (а) и безразмерной силы резания (б) при $k_c=0,5$ и $p=1,5$ при выключенном управлении

Далее на Рис. 5 представлены зависимости коэффициента непрерывности резания от безразмерной жесткости резания для трех вариантов: без управления, с возбуждением по гармоническому закону и управления с обратной связью, пропорционально виброскорости. На каждой зависимости можно выделить область, где $\psi = 1$, здесь колебания не возбуждаются, что соответствует Рис. 3, и область с $\psi < 1$, где происходит возбуждение колебаний, и стружка дробится, что соответствует Рис. 4. Из Рис. 5, а видно, что в случае отсутствия управления коридор значений k_c (выделен зеленым), при котором достигаются рациональные значения коэффициента непрерывности $\psi=0,8\dots0,9$, очень узок. Следовательно, в силу высокой чувствительности порогового значения k_c к величине диссипации энергии в системе (Y. Altintas) и в силу существенной нестабильности последней, обеспечение вибрационного процесса с требуемым значением ψ за счет

выбора системных параметров практически недостижимо. Из Рис. 5, б, в можно заключить, что введение управления по двум рассматриваемым законам смещает коридор с рациональными значениями ψ , но не увеличивает его размер, следовательно, проблема не решается путем применения неадаптивных законов управления динамикой вибрационного сверления.

В данной работе предложен новый алгоритм управления динамикой вибрационного сверления, включающий линейную обратную связь по виброскорости подвижной части вибропатрона, коэффициент обратной связи адаптируется по размаху колебаний. Закон управления:

$$P_a = k_y b \dot{q} \quad (8)$$

где k_y – безразмерный коэффициент усиления управляющего сигнала; b – безразмерный коэффициент обратной связи, задаваемый контроллером.

Закон адаптации задается следующим соотношением:

$$\begin{cases} b = b_{\max}, & A < (1-g_1)A_0 \\ \dot{b} = -c_1 \left(\frac{A}{A_0} - 1 \right) - c_2 \frac{\dot{A}}{A_0}, & (1-g_1)A_0 \leq A \leq (1+g_2)A_0 \\ b = b_{\min}, & A > (1+g_2)A_0 \end{cases} \quad (9)$$

где A – размах безразмерных перемещений q ; A_0 – целевое значение размаха; c_1, c_2 – безразмерные параметры адаптации; g_1, g_2 – безразмерные параметры коридора допустимых значений размаха; b_{\min}, b_{\max} – соответственно, наименьшее и наибольшее возможные значения коэффициента обратной связи b , определяются разрядностью цифроаналогового преобразователя контроллера.

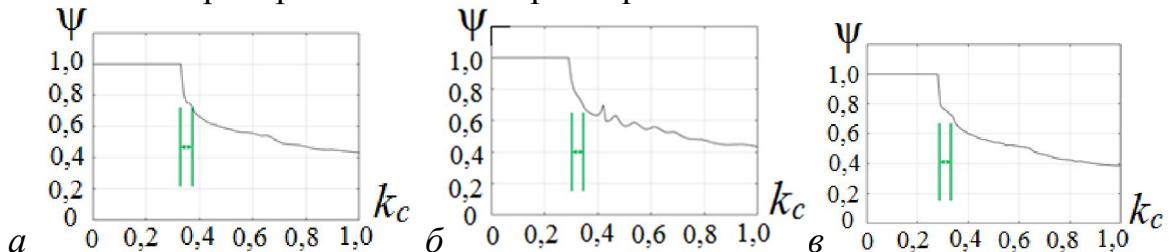


Рис. 5. Зависимости коэффициента непрерывности резания от безразмерной жесткости резания при $p = 1,5$ для трех вариантов управления: без управления (а), по гармоническому закону (б) и линейная обратная связь по виброскорости (в)

Результаты многовариантного моделирования динамики системы при управлении с адаптацией по размаху колебаний представлены на Рис. 6. Видно, что коридор значений k_c , при которых обеспечиваются рациональные значения коэффициента непрерывности ψ , существенно расширился. Следовательно, обеспечение требуемого значения ψ практически достижимо. Отсутствие дробления стружки в области малых значений k_c связано с недостаточной мощностью возбуждения и с отсутствием колебаний в этом случае. Кроме того, предложенному

алгоритму присущ недостаток, проиллюстрированный на Рис. 7. Как видно, область значений k_c , на которой обеспечивается цель управления по размаху колебаний A , не совпадает с областью дробления стружки. То есть выполнение цели управления по размаху колебаний не означает автоматического обеспечения дробления стружки. Следовательно, данный алгоритм управления следует дополнить рекомендациями по назначению целевого значения размаха колебаний A_0 с учетом требования обеспечения рациональных значений коэффициента непрерывности ψ .

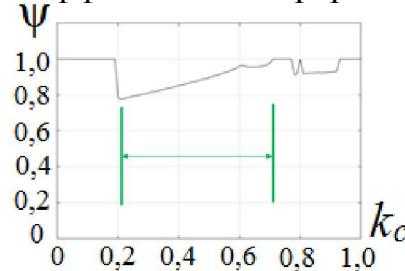


Рис. 6. Зависимость коэффициента непрерывности резания от безразмерной жесткости резания для случая управления с адаптацией по размаху колебаний, $p = 1,5$, $A_0 = 1,5$

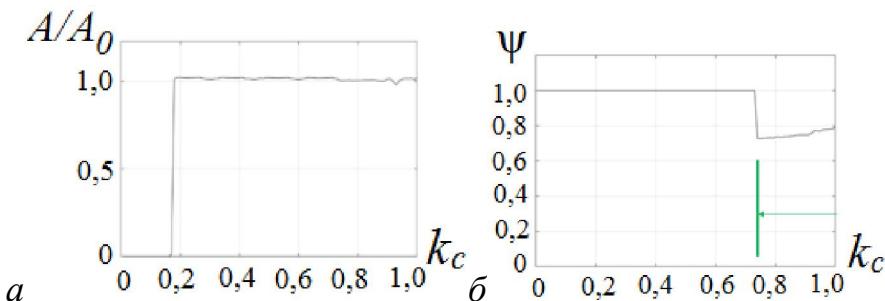


Рис. 7. Зависимости от безразмерной жесткости размаха колебаний (а) и коэффициента непрерывности резания (б) для случая управления с адаптацией по размаху колебаний, $p = 1,8$, $A_0 = 1,5$

В третьей главе разработана стратегия назначения целевого размаха колебаний, обеспечивающего заданный коэффициент непрерывности резания, проведено исследование влияния на качество управляемого вибрационного процесса параметров адаптации, параметров аналого-цифрового преобразования сигнала, коэффициента усиления, отставания по фазе и временных задержек в цепи обратной связи, вида закона сил резания и наличия твердых включений в материале. Кроме того, разработаны рекомендации по обеспечению динамической устойчивости недеформированной формы сверла в условиях вибрационного резания.

Предложена стратегия вычисления целевого значения размаха колебаний, обеспечивающего заданное значение коэффициента непрерывности ψ . Стратегия заключается в моделировании динамики управляемого процесса вибрационного сверления, но целевое значение размаха колебаний также адаптируется. Иллюстрация стратегии приведена на Рис. 8. Результатом моделирования является зависимость целевого значения размаха A_0 ,

обеспечивающего заданное значение коэффициента непрерывности ψ_0 , от параметров p , k_c . Пример результатов моделирования для $\psi_0=0,8$ приведен на Рис. 9. Видно, что практически на всем рассматриваемом диапазоне реализуется значение коэффициента непрерывности ψ , близкое к требуемому. Следовательно, в случае правильного выбора целевого размаха колебаний, выполнение цели управления по размаху колебаний будет обеспечивать требуемый вибрационный режим с дроблением стружки.

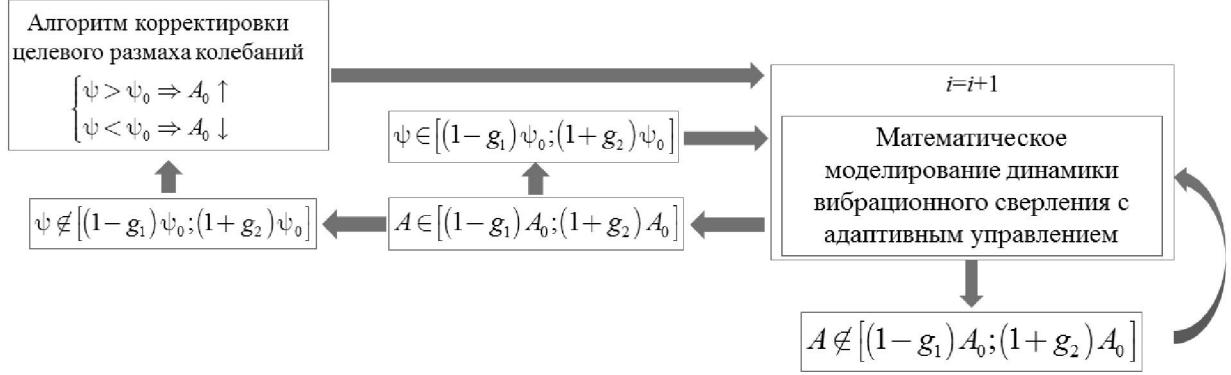


Рис. 8. Алгоритм вычисления целевого размаха колебаний, обеспечивающего требуемый коэффициент непрерывности резания

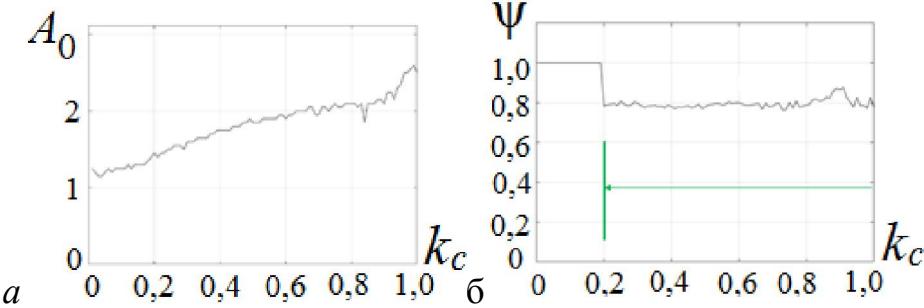


Рис. 9. Зависимости целевого размаха колебаний (а) и коэффициента непрерывности резания (б) от параметра k_c при $p = 1,5$, $\psi_0=0,8$

На основе разработанной стратегии предложена методика обеспечения сегментации стружки. Приведем ее сокращенную версию для случая, когда частота вращения, параметры вибропатрона и подача фиксированы:

1. Вычисление значений p , k_c по формулам (6), (7).
2. Назначение целевого размаха колебаний A_0 , обеспечивающего заданный ψ_0 , на основе математического моделирования в соответствии с описанной выше стратегией.
3. Выполнение операции сверления с включенной системой управления с целевым размахом колебаний, заданным в п.2.

В четвертой главе описан экспериментальный стенд, разработанный для апробации различных стратегий управления, приведены результаты экспериментов по вибрационному сверлению для случая отсутствия и наличия управления по разработанной стратегии.

Схема экспериментальной установки представлена на Рис. 10. При постановке эксперимента применена измененная схема технологического процесса: предполагается податливое закрепление не инструмента, а заготовки, к которой подводится управляющее воздействие. Сверло при

этом зажато в стандартном цанговом патроне. На Рис. 11 приведены фотографии упругого приспособления для эксперимента, сверла и вибровозбудителя.

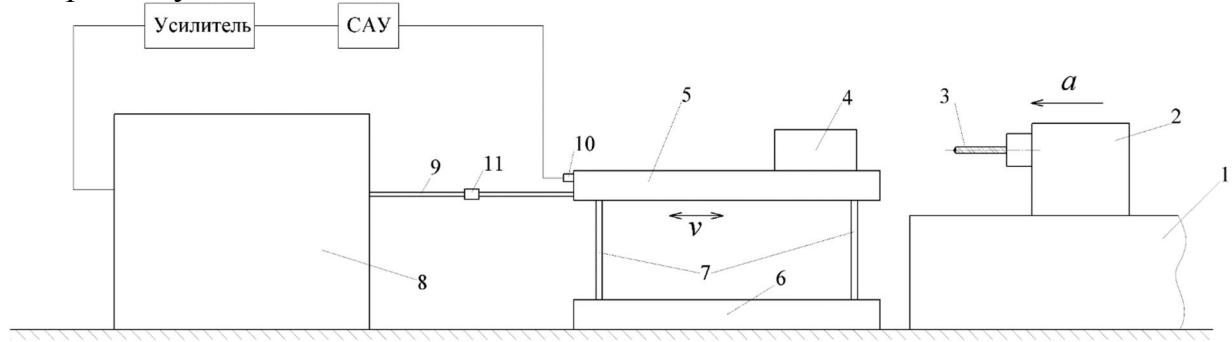


Рис. 10. Схема экспериментальной установки

1 – станина, 2 – привод, 3 – сверло, 4 – заготовка, 5,6 – соответственно подвижная и неподвижная части упругого приспособления, 7 – упругие элементы, 8 – вибровозбудитель, 9 – шток, 10 – акселерометр, 11 – датчик сил, *a* – направление подачи, *v* – направления вибраций заготовки.

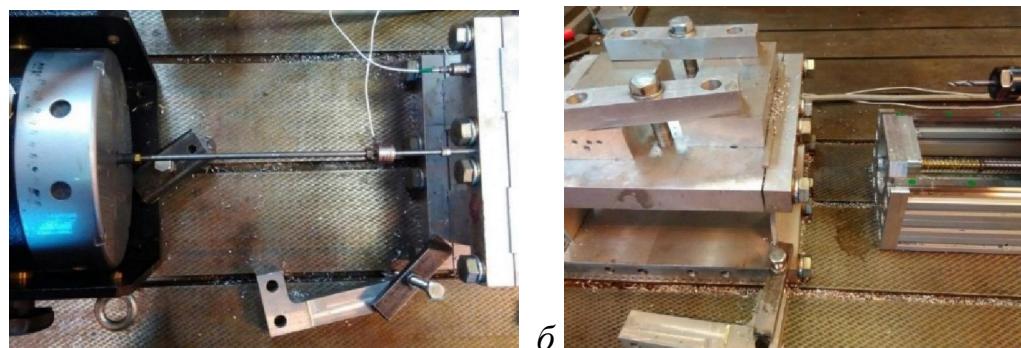


Рис. 11. Вид на вибровозбудитель и шток (а), передающий усилия на упругое приспособление, и вид на упругое приспособление и патрон (б)

Предварительным модальным тестированием идентифицированы параметры упругого приспособления с закрепленной заготовкой: собственная частота 70,86 Гц; модальная жёсткость 2050 Н/мм; безразмерный коэффициент затухания 0,0688; модальная масса (масса подвижной части с учётом ножек и испытываемого образца) 10,34 кг. Материал заготовки – АМГ6. Диаметр инструмента – 6 мм, подача на режущую кромку – 0,02 мм.

На Рис. 12 приведены результаты экспериментов по вибрационному сверлению на частоте 2000 об/мин при наличии предварительно просверленного отверстия диаметром 3 мм. На Рис. 13 приведены аналогичные результаты для частоты 2500 об/мин. Целевое значение размаха колебаний в обоих случаях равно 0,06 мм. Из рисунков видно, что на частоте 2000 об/мин система управления раскачивает колебания системы, увеличивая их размах до целевого уровня, а на частоте 2500 об/мин, напротив, работает на ограничение колебаний системы. Для случая

сверления сплошного отверстия результаты эксперимента для частоты вращения 2000 об/мин представлены на Рис. 14. Как видно, система управления также отрабатывает цель управления. Спектр перемещений для этого случая приведен на Рис. 15. Наличие одного выраженного пика на спектре позволяет заключить, что процесс имеет моногармонический характер, что подтверждает правильность выбора модели с одной степенью свободы.

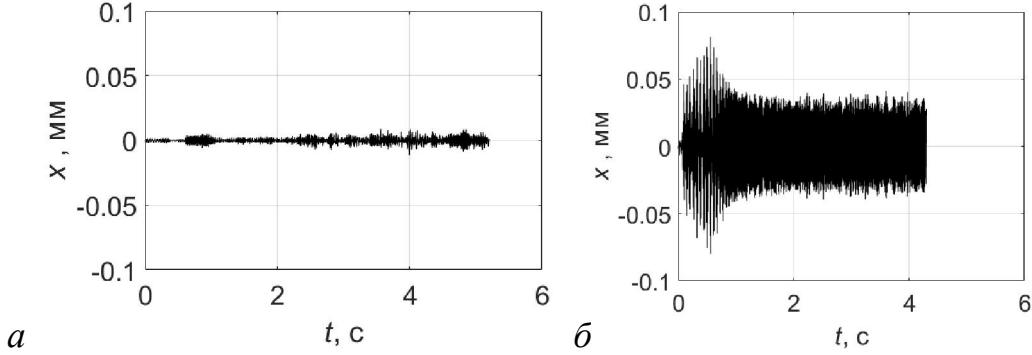


Рис. 12. Зависимости от времени перемещений упругого приспособления при сверлении на частоте 2000 об/мин при наличии предварительно просверленного отверстия диаметром 3 мм для случаев отсутствия (*a*) и наличия (*б*) управления

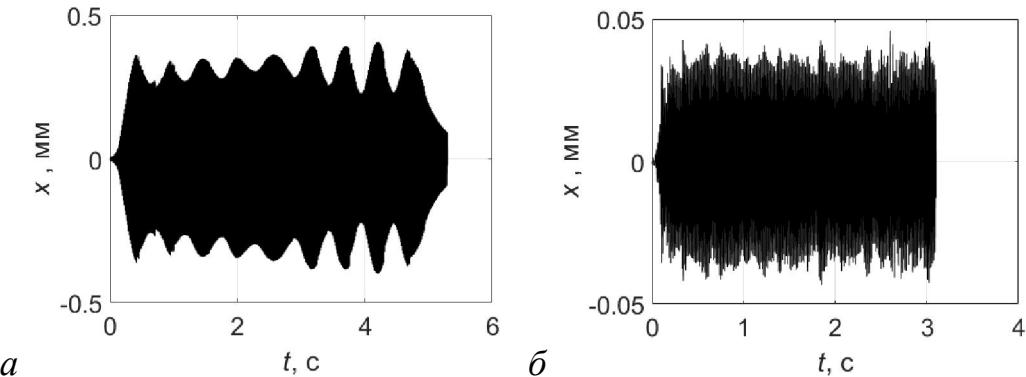


Рис. 13. Зависимости от времени перемещений упругого приспособления при сверлении на частоте 2500 об/мин при наличии предварительно просверленного отверстия диаметром 3 мм для случаев отсутствия (*a*) и наличия (*б*) управления

Основным способом представления результатов исследования влияния параметров обработки на динамику вибрационного сверления является диаграмма Пуанкаре. Её построение осуществлялось путем определения всех экстремумов получаемого в результате моделирования или эксперимента сигнала перемещений и последующего их отложения на диаграмме на вертикальной линии, соответствующей текущему значению частоты вращения. Сопоставление диаграмм Пуанкаре для случаев отсутствия и наличия управления при отсутствии предварительно просверленного отверстия приведено на Рис. 16. Из диаграмм Пуанкаре видно, что в случае введения управления на всех режимах обеспечиваются

колебания с размахом, близким к заданному. Работоспособность системы управления экспериментально подтверждена.

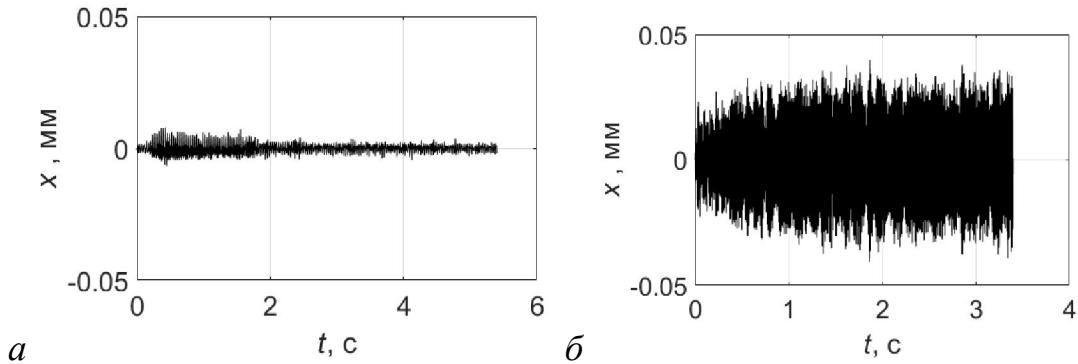


Рис. 14. Зависимости от времени перемещений упругого приспособления при сверлении на частоте 2500 об/мин для случаев отсутствия (а) и наличия (б) управления

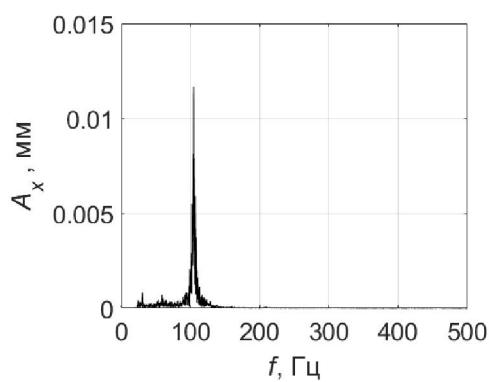


Рис. 15. Спектр перемещений упругого приспособления при сверлении на частоте 2500 об/мин для случая наличия управления

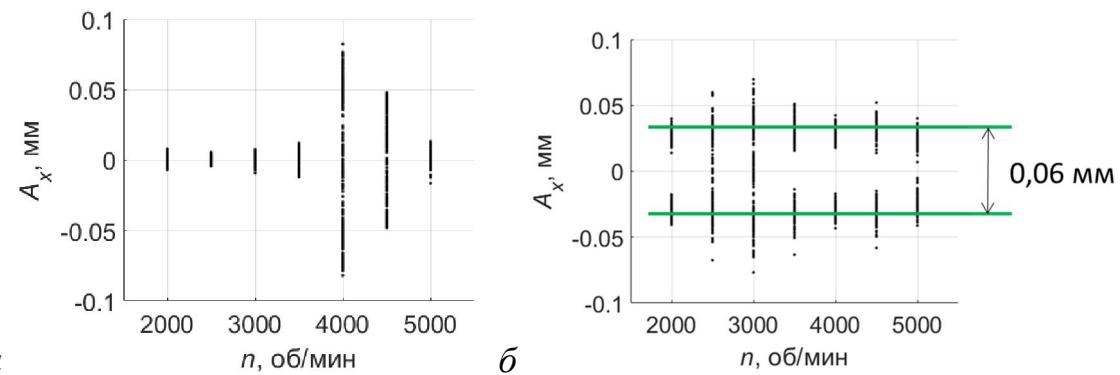


Рис. 16. Диаграммы Пуанкаре перемещений упругого приспособления для случаев отсутствия (а) и наличия (б) управления

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель динамики замкнутой системы «упругая система-рабочий процесс-система управления» для процесса вибрационного сверления.

2. Разработан пакет программ в комплексе MATLAB для моделирования динамики управляемого процесса вибрационного сверления с учетом дискретизации сигнала по уровню и по времени, и с возможностью подключения различных алгоритмов управления.
3. Предложен новый закон управления динамикой вибрационного сверления с коэффициентом обратной связи, адаптивным по размаху колебаний.
4. Исследования динамики разработанной математической модели на базе введенных интегральных характеристик процесса вибрационного сверления показали, что новый закон управления обеспечивает цель управления в более широком диапазоне системных параметров, чем разработанные ранее системы.
5. Разработана методика обеспечения дробления стружки, включающая вычисление целевого размаха колебаний и диапазона режимов обработки, при которых обеспечивается дробление стружки с использованием разработанной системы управления.
6. Сформулированы требования к параметрам разрешения аналого-цифрового преобразования, коэффициенту усиления системы управления, фазовым характеристикам аналоговых фильтров и временной задержке, связанной с вычислениями контроллера, при выполнении которых обеспечивается качество управления по разработанному закону.
7. Продемонстрирована работоспособность предложенного закона управления при наличии неоднородностей или изменении обрабатываемого материала в процессе обработки.
8. Разработан экспериментальный стенд, включающий привод для сверления, упругое приспособление для закрепления детали, актуатор и адаптивную систему управления, предназначенный для верификации математической модели динамики вибрационного сверления, различных стратегий управления вибрациями при сверлении и разработанной методики обеспечения дробления стружки.
9. Эксперименты на стенде подтвердили работоспособность разработанной системы управления.
10. Разработанные пакеты программ внедрены в учебный процесс. Разработанная методика внедрена в серийное производство на филиале «НИИД» АО «МСЗ-САЛЮТ».

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ И.И. ИВАНОВА

1. Иванов И. И., Киселёв И. А. Влияние режимов обработки на динамику податливого инструмента при плоском фрезеровании // Машиностроение и инженерное образование. 2014. № 3. С. 47-54. (0.92 п.л. / 0.61 п.л.).
2. Существующие методы обеспечения низкочастотных вибраций инструмента с целью дробления стружки при сверлении отверстий / И.И.

Иванов [и др.] // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 12. С. 842-857. (1.85 п.л. / 0.8 п.л.).

3. Воронов С. А., Иванов И. И., Киселёв И. А. Исследование процесса фрезерования на основе редуцированной динамической модели инструмента // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2015. № 1. С. 62-70. (1.04 п.л. / 0.5 п.л.). [Voronov S.A., Ivanov I.I., Kiselev I.A. Investigation of the milling process based on a reduced dynamic model of cutting tool // Journal of machinery manufacture and reliability. 2015. Vol. 44, No. 1. P. 70-78.]

4. Иванов И. И., Киселёв И. А., Колоскова А. В. Исследование влияния режимов обработки на изгибные вибрации инструмента при сверлении // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 11. С. 585-597. (1.5 п.л. / 0.5 п.л.).

5. Обзор литературных источников по моделированию динамики процесса сверления / И.И. Иванов [и др.] // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 12. С. 240-265. (3.0 п.л. / 0.5 п.л.).

6. Investigation of vibratory drilling model with adaptive control. Part 1: control of cutting continuity index / I.I. Ivanov [et al.] // Journal of Vibroengineering. 2015. Vol. 17, № 7. P. 3702-3714. (1.5 п.л. / 0.5 п.л.).

7. Investigation of vibratory drilling model with adaptive control. Part 2: mixed control of peak-to-peak vibration displacement and cutting continuity index / I.I. Ivanov [et al.] // Journal of Vibroengineering. 2015. Vol. 17, № 8. P. 4301-4312. (1.39 п.л. / 0.6 п.л.).

8. Моделирование вибраций при плоском фрезеровании с коррекцией частоты вращения в реальном времени / И.И. Иванов [и др.] // Машиностроение и компьютерные технологии. 2017. № 03. С. 1-16. (1.85 п.л. / 0.62 п.л.).

9. Колоскова А. В., Киселёв И. А., Иванов И. И. Моделирование динамики процесса точения с учетом податливости обрабатываемой детали // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2017. Том 9, №2. (1.96 п.л. / 0.6 п.л.).

10. Chatter suppression in boring with tool position feedback control / I.I. Ivanov [et al.] // Journal of Vibroengineering. 2017. Vol. 19, № 5. P. 3512-3521. (1.16 п.л. / 0.42 п.л.).

11. Иванов И. И., Воронов С. А. Исследование динамики процесса вибрационного сверления с управлением по размаху колебаний // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. № 9. 14 с. <http://engjournal.ru/catalog/mecn/dsmi/1806.html> (1.62 п.л. / 1.2 п.л.).