

На правах рукописи



Жуков Никита Александрович

**Моделирование динамики многокоординатного фрезерования с  
учетом контактного взаимодействия по задней поверхности  
зубьев режущего инструмента**

Специальность 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2023

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:

кандидат технических наук  
**Киселёв Игорь Алексеевич**

Официальные оппоненты:

**Куц Вадим Васильевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Юго-Западный государственный университет" (ФГБОУ ВО «ЮЗГУ»)

**Шохин Александр Евгеньевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории вибромеханики федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН)

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

Защита состоится «04» октября 2023 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета 24.2.331.12 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5., стр. 1. Ваш отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru). Телефон для справок: +7(499)263-66-39

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., доцент

Мурашов  
Михаил Владимирович

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы.** В современном машиностроении широко распространены тонкостенные детали со сложной пространственной геометрией поверхности, изготавливаемые с применением механической лезвийной обработки. Данный процесс сопровождается вибрациями различного типа в технологической системе деталь-инструмент, включая регенеративные автоколебания, вызванные обработкой поверхности, полученной на предыдущем проходе режущей кромки (эффект резания по следу). При определенных соотношениях технологических параметров колебательное движение может принимать неустойчивый характер, что приводит к повышенным значениям сил резания, амплитуд вибраций и, как следствие, ухудшению качества обрабатываемой поверхности. При механической обработке деталей из труднообрабатываемых жаропрочных материалов имеются жесткие ограничения на допустимую скорость резания: при данных условиях обработки интенсифицируется контактное взаимодействие между задней поверхностью зубьев режущего инструмента и обрабатываемой заготовкой. Силы контактного взаимодействия по задней поверхности зубьев режущего инструмента приводят с одной стороны к снижению стойкости применяемого инструмента, с другой стороны - оказывает демпфирующе воздействие на технологическую систему, увеличивая зону виброустойчивых режимов обработки резанием. Учет сил контактного взаимодействия по задней поверхности зубьев режущего инструмента при моделировании динамики процесса лезвийной обработки позволит рассчитывать более производительные виброустойчивые режимы лезвийной обработки, свободные от высокоамплитудных вибраций. Учет данных эффектов при разработке технологии изготовления тонкостенных деталей из жаропрочных никелевых и титановых сплавов, применяемых в авиакосмической отрасли, особенно важен, поэтому вопросы влияния контакта по задней поверхности зубьев режущего инструмента на динамику процесса обработки резанием являются актуальными. В то же время методики моделирования взаимодействия по задней поверхности зубьев режущего инструмента, представленные в литературе, недостаточно проработаны для общего случая пространственной лезвийной обработки и не позволяют учсть сложную геометрию задней поверхности зубьев режущего инструмента. Данная работа посвящена разработке модели динамики пространственного (многоосевого) фрезерования податливых деталей из труднообрабатываемых сплавов с учетом контактного взаимодействия по задней поверхности зубьев режущего инструмента.

**Целью диссертационной работы** является прогнозирование виброустойчивых режимов обработки податливых деталей из труднообрабатываемых материалов на основе разработки модели динамики пространственного фрезерования с учетом контактного взаимодействия по задней поверхности зубьев режущего инструмента.

**Для реализации поставленной цели были решены следующие задачи:**

1. Разработана имитационная модель динамики многоосевого концевого фрезерования податливых деталей из труднообрабатываемых сплавов, учитывая пространственный характер контактного взаимодействия по задней поверхности зубьев режущего инструмента.
2. Разработана модель распределенного пространственного силового взаимодействия материала детали с задней и передней поверхностями зубьев фрезы.
3. Разработан алгоритм геометрического моделирования процесса взаимодействия задней поверхности зубьев режущего инструмента с обрабатываемой деталью.
4. Выполнена верификация разработанной модели на основе экспериментальных результатов, приведенных в литературных источниках.

5. На основе разработанной модели проведено исследование виброустойчивости обработки фрезерованием податливой детали при изменении скорости резания и геометрических параметров режущего клина инструмента.

**Методы исследования.** В диссертации используются МКЭ, метод разложения движения по собственных формам механической системы, метод простой итерации для решения нелинейных уравнений динамики, алгоритм многоуровневого буфера глубины для построения геометрических моделей поверхности.

**Научная новизна:**

1. Разработана модель динамики процесса многокоординатной лазерной обработки податливых деталей, учитывая нелинейный характер взаимодействия по задней поверхности зубьев режущего инструмента и эффект запаздывания.
2. Разработана методика расчета сил взаимодействия по задней поверхности зубьев режущего инструмента, использующая совокупность пространственного геометрического алгоритма и феноменологической модели, с учетом вибраций в технологической системе.

**Практическая значимость диссертации** заключается в том, что разработанные методики и программное обеспечение позволяют учитывать геометрические характеристики задней поверхности зубьев режущего инструмента при выборе виброустойчивых режимов на основе анализа результатов имитационного моделирования процесса многокоординатного фрезерования.

**Достоверность полученных результатов,** представленных в диссертационной работе, подтверждается строгостью использованных математических методов, проверкой разработанных алгоритмов и программ на модельных и тестовых задачах, сопоставлением полученных автором результатов с расчетными и экспериментальными данными из открытых литературных источников.

**Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации.** Изложенные в диссертационной работе математические модели, алгоритмы, результаты исследований и разработок получены лично соискателем в процессе научной деятельности. Из совместных публикаций в диссертацию включен только материал, который непосредственно принадлежит соискателю, заимствованный материал обозначен в работе ссылками.

**Внедрение.** Результаты диссертации внедрены в учебный процесс кафедры прикладной механики МГТУ им. Н.Э. Баумана и в процесс разработки технологии фрезерной обработки моноколес в АО «ОДК» «НИИД», что подтверждено соответствующими актами.

**На защиту выносятся следующие положения диссертации:**

1. Модель динамики процесса многокоординатного концевого фрезерования податливых деталей, учитывающая влияние геометрии задней поверхности зубьев режущего инструмента на характер и амплитуду вибраций, возбуждающихся в технологической системе в процессе обработки.

2. Выявленные закономерности влияния технологических параметров режима обработки и геометрических параметров режущего клина инструмента на динамику процесса многокоординатного концевого фрезерования податливых деталей.

**Апробация работы.** Основные положения настоящей работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: на научных семинарах кафедры прикладной механики МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, 2017-2021; на международной конференции 3rd International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines, DVM-2016. Самара, 2016; на IV Международной Школе-конференции молодых ученых «Нелинейная динамика машин» SCHOOL-NDM 2017. Москва, 2017; на II Всероссийской научно-технической конференции, посвященной юбилеям основателей кафедры прикладной механики МГТУ им. Н.Э. Баумана профессоров Пономарева С.Д., Бидермана В.Л., Лихарева К.К., Малинина Н.Н., Светлицкого В.А. Москва, 2017; на международной конференции International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment (ICMTMTE-2018). Севастополь, 2018; на конференции «Технологии специального приборостроения. Молодежь в науке». Заречный, 2020.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, в том числе 2 работы в изданиях, рекомендованных ВАК, и 3 работы в изданиях, индексируемых в Scopus, а также получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Общий объем составляет 167 страниц, 53 рисунка, 11 таблиц, 55 формул. Список используемой литературы содержит 138 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, приведена цель работы, постановка задач и краткая аннотация содержания

работы по разделам, дана оценка научной новизны и практической значимости полученных результатов.

**В первой главе** приведены результаты аналитического обзора литературных источников, посвященных современному состоянию вопроса моделирования динамики многоосевого фрезерования податливых деталей из труднообрабатываемых сплавов. Выделены основные подходы к исследованию динамики лезвийной обработки: анализ устойчивости установившегося процесса резания в частотной области и имитационное моделирование процесса во временной области. Обзор литературы показал, что в настоящее время отсутствуют имитационные модели динамики многоосевого фрезерования, позволяющие учитывать пространственный характер контактного взаимодействия между задней поверхностью зубьев режущего инструмента и материалом детали.

**Вторая глава** посвящена описанию разработанной имитационной модели динамики многоосевого фрезерования тонкостенных деталей из труднообрабатываемых сплавов (ее структура представлена на Рис. 1). В разработанной модели динамики фрезерования обрабатываемая деталь считается податливой, а режущий инструмент - абсолютно жестким.



Рис. 1. Структура имитационной модели динамики многокоординатного фрезерования податливых деталей из труднообрабатываемых сплавов

Дискретизация обрабатываемой детали производится с использованием 10-узлового твердотельного конечного элемента (КЭ) с квадратичными функциями формы. Модель динамики обрабатываемой детали в процессе фрезерования описывается следующей системой нелинейных

дифференциальных уравнений второго порядка с запаздыванием:

$$[M] \cdot \ddot{\bar{X}}(t) + [B] \cdot \dot{\bar{X}}(t) + [K] \cdot \bar{X}(t) = \bar{F}\left(t, \bar{X}(t), \bar{X}(t-T), \dot{\bar{X}}(t), P, TP, TR, G\right), \quad (1)$$

где  $\bar{X}(t), \dot{\bar{X}}(t), \ddot{\bar{X}}(t)$  – вектора узловых перемещений, скоростей и ускорений заготовки;

$[M], [B], [K]$  – матрицы масс, демпфирования и жесткости КЭ модели заготовки соответственно;

$T$  – период прохождения режущих кромок фрезы, с;

$\bar{F}(t, \bar{X}(t), \bar{X}(t-T), P, TP, TR, G)$  – нелинейная векторная функция сил резания, зависящая от времени ( $t$ ), векторов узловых перемещений на текущий момент времени ( $\bar{X}(t)$ ) и в момент прохождения предыдущей режущей кромки  $\bar{X}(t-T)$ , совокупности физических свойств режущего инструмента и обрабатываемого материала (P), траектории движения режущего инструмента в процессе обработки (TP), совокупности технологических параметров, определяющих режим обработки (TR), геометрии поверхности обрабатываемой заготовки (G).

Моделирование динамики заготовки под действием сил резания производится методом разложения движения по базису собственных форм конструкции (методом главных координат), система уравнений (1) преобразуется в  $n$  дифференциальных уравнений движения (где  $n$  - число собственных форм заготовки, учитываемых при разложении движения):

$$\ddot{q}_k(t) + 2 \cdot p_k \cdot \xi_k \cdot \dot{q}_k(t) + p_k^2 \cdot q_k(t) = \frac{Q_k(t, q_1(t), q_1(t-T), q_2(t), q_2(t-T), \dots, q_n(t), q_n(t-T))}{\mathcal{M}_k}, \quad (2)$$

где  $q_k(t)$  –  $k$ -ая главная координата;

$\mathcal{M}_k$  –  $k$ -ая обобщенная масса;

$p_k$  –  $k$ -ая собственная частота заготовки,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;

$Q_k(t, q_1(t), q_1(t-T), q_2(t), q_2(t-T), \dots, q_n(t), q_n(t-T))$  –  $k$ -ая обобщенная сила;

$T$  – период прохождения режущих кромок фрезы, с;

$\xi_k$  – коэффициенты модального демпфирования.

Важной проблемой при решении системы нелинейных дифференциальных уравнений (1) является расчет правой части - сил резания. В данной работе для расчета сил резания на каждом шаге по времени используются два блока имитационной модели (Рис. 1): блок геометрического алгоритма и феноменологическая модель сил резания.

В начале каждого шага по времени определяется взаимное положение геометрических моделей фрезы и обрабатываемой заготовки. Геометрическая модель концевой фрезы представляет собой совокупность элементарных режущих клиньев, полученных при дискретизации режущих зубьев инструмента: каждый элементарный режущий клин обладает задней и передней поверхностью

(Рис. 2).

Геометрическая модель инструмента позволяет учитывать: пространственную геометрию винтовых режущих кромок концевой фрезы, характеризуемых своим углом подъема, а также наличие задней поверхности инструмента (или площадки износа задней поверхности) с постоянным задним углом в плоскости, перпендикулярной режущей кромке.

В настоящей работе для создания геометрической модели поверхности применяется алгоритм 3MZBL (Киселёв И.А., 2012), являющийся модификацией метода декселей. Алгоритм 3MZBL может быть использован для построения геометрических моделей поверхностей объектов произвольной пространственной формы.

На каждом шаге по времени в блоке геометрического алгоритма для каждого элементарного режущего клина модели инструмента независимо рассчитываются две величины: мгновенная толщина срезаемого слоя, объем материала, вдавленного задней поверхностью режущего клина.

Для определения толщины срезаемого слоя из каждой точки дискретизации режущей кромки модели инструмента выполняется построение отрезка перпендикулярно линии режущей кромки в направлении оси инструмента до пересечения с моделью поверхности.

Для расчета объема материала производится дискретизация задней поверхности элементарного режущего клина (Рис. 2). Из отрезков пересечения лучей направления глубины виртуального проникновения (Рис. 2) с геометрической моделью поверхности заготовки рассчитывается эпюра глубины проникновения материала в заднюю поверхность элементарно режущего клина. Объем материала, вдавленного задней поверхностью, определяется в предположении постоянства эпюр глубины проникновения в пределах элементарного режущего клина (в направлении вдоль линии режущей кромки):

$$\Delta V_i = S_i \cdot \Delta l_i; \quad S_i = \frac{b_{fl}}{n_{fl}} \cdot \sum_{j=1}^{n_{fl}} h_{ij}^{fl}, \quad (3)$$

где  $\Delta V_i$  – объем материала, вдавленного задней поверхностью  $i$ -го элементарного режущего клина,  $\text{мм}^3$ ;

$S_i$  – площадь под эпюрою глубины проникновения, рассчитанной вдоль

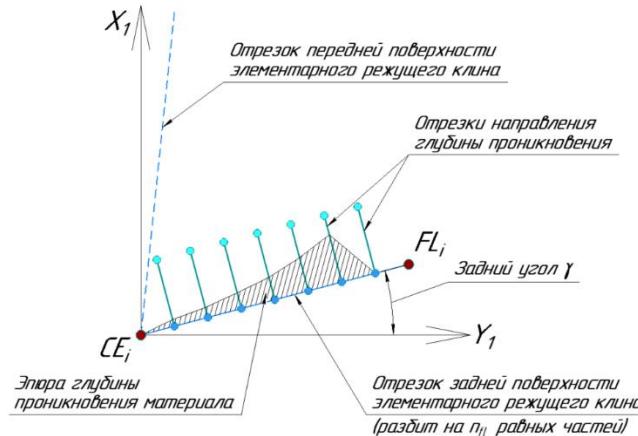


Рис. 2. Дискретизация задней поверхности элементарного режущего клина

отрезка задней поверхности,  $\text{мм}^2$ ;

$b_{fl}$  – длина отрезка задней поверхности, мм;

$\Delta l_i$  – длина отрезка  $i$ -ой элементарной режущей кромки, мм;

$h_{ij}^{fl}$  – глубина проникновения материала в заднюю поверхность  $i$ -го элементарного режущего клина, рассчитанная в  $j$ -ой точке отрезка задней поверхности, разбитого на  $n_{fl}$  равных частей, мм.

Результатом работы геометрического алгоритма являются пространственные эпюры распределения толщины срезаемого слоя вдоль режущих кромок концевой фрезы и глубины проникновения материала в заднюю поверхность режущих зубьев. На Рис. 3 приведен пример работы геометрического алгоритма для случая концевого фрезерования канала в 4-осевом режиме. Помимо движения подачи и основного движения резания на фрезу наложено кинематически-заданное колебательное движение по гармоническому закону в направлении, перпендикулярном плоскости заготовки.

Расчет сил резания производится для каждого элементарного режущего клина дискретизированной модели инструмента в соответствии со следующим соотношением:

$$\overline{\Delta F_i} = \overline{\Delta F_i^s}(h) + \overline{\Delta F_i^{pl}}(V), \quad (4)$$

где  $\overline{\Delta F_i}$  - вектор сил резания, действующих на  $i$ -ый элементарный режущий клин, Н;

$\overline{\Delta F_i^s}(h)$  - вектор сил резания, действующих по передней поверхности режущего клина (является функцией толщины срезаемого слоя), Н;

$\overline{\Delta F_i^{pl}}(V)$  - вектор сил резания, действующих по задней поверхности режущего клина (является функцией объема вдавленного материала детали), Н.

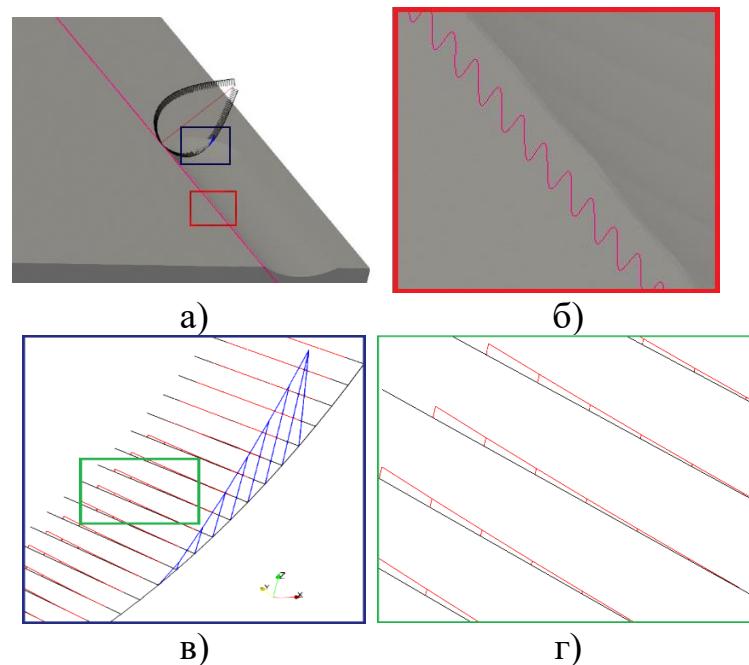


Рис. 3. Результаты работы геометрического алгоритма на шаге по времени: а) схема обработки; б) траектория движения фрезы; в) эпюра мгновенной толщины срезаемого слоя; г) эпюра глубины проникновения задней поверхности режущего клина в материал детали

Расчет компонент вектора сил резания  $\overline{\Delta F_i^s}(h)$ , действующих по передней поверхности, производится в локальной системе координат, связанной с режущей кромкой  $i$ -го элементарного режущего клина, в соответствии с линейной феноменологической моделью:

$$\Delta F_{ji}^s = K_{jC} \cdot h_i \cdot \Delta b_i, \quad (5)$$

где  $i$  – номер рассматриваемого элементарно режущего клина;  
 $j$  – индекс компоненты вектора сил резания  $\overline{\Delta F_i^s}$  :  $j = t, r, a$  тангенциальная, радиальная и осевая компонента соответственно;  
 $K_{jC}$  – коэффициенты феноменологической модели сил резания, МПа;  
 $h_i$  – толщина срезаемого слоя для  $i$ -го элементарного режущего клина, мм;  
 $\Delta b_i$  – ширина резания  $i$ -го элементарного режущего клина (рассчитывается как длина элементарной режущей кромки  $\Delta l_i$  вдоль образующей тела вращения фрезы), мм.

Силы резания  $\overline{\Delta F_i^{pl}}(V)$ , действующие по задней поверхности элементарного режущего клина, разделяются на статическую  $\overline{\Delta F_i^{pl,st}}$  и динамическую  $\overline{\Delta F_i^{pl,d}}(V)$  компоненты. Статическая компонента  $\overline{\Delta F_i^{pl,st}}$  сил резания по задней поверхности возникает вследствие наличия точки разделения материала на скруглении у вершины режущего клина, возникает независимо от наличия вибраций в технологической системе и рассчитывается по следующему закону:

$$\Delta F_{ji}^{pl,st} = K_{jb} \cdot \Delta l_i \cdot H(h_i), \quad (6)$$

где  $K_{jb}$  – коэффициент феноменологической модели кромочных сил резания,  $\frac{H}{\text{мм}}$ ;  
 $\Delta l_i$  – длина отрезка  $i$ -ой элементарной режущей кромки, мм;  
 $j$  – индекс компоненты вектора сил резания;  
 $H(h_i)$  - функция Хевисайда от толщины срезаемого слоя

Динамическая компонента  $\overline{\Delta F_i^{pl,d}}$  сил резания, действующих по задней поверхности, возникает только при наличии вибраций, является линейной функцией от объема вдавленного материала детали и действует в плоскости, перпендикулярной элементарной режущей кромке:

$$\begin{aligned} \Delta F_{ni}^{pl,d} &= K_V \cdot \Delta V_i \\ \Delta F_{ti}^{pl,d} &= \mu \cdot \Delta F_{ni}^{pl,d}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $K_V$  – коэффициент индентирования,  $\frac{H}{\text{мм}^3}$ ;  
 $\mu$  – коэффициент сухого трения;

$\Delta V_i$  – объем материала, вдавливаемого задней поверхностью  $i$ -го элементарного режущего клина,  $\text{мм}^3$ ;

$\Delta F_{ni}^{pl,d}, \Delta F_{ti}^{pl,d}$  – нормальная и тангенциальная компоненты, Н.

Нормальная компонента сил  $\Delta F_{ni}^{pl,d}$  перпендикулярна отрезку задней поверхности элементарного режущего клина и направлена от оси фрезы при вычислении сил, действующих на обрабатываемую заготовку. Касательная компонента  $\Delta F_{ti}^{pl,d}$  перпендикулярна нормальной компоненте  $\Delta F_{ni}^{pl,d}$ : положительное направление компоненты  $\Delta F_{ti}^{pl,d}$  образует острый угол с вектором главного движения резания  $\bar{V}$  при записи сил, действующих на заготовку.

Силы резания, рассчитанные для каждого элементарного режущего клина, приводятся к неподвижной глобальной системе координат, а затем преобразовываются в узловые силы в КЭ модели заготовки.

Особенностью численного моделирования динамики процесса фрезерования является наличие нелинейной правой части в системе дифференциальных уравнений движения (1). Значение величины сил резания, действующих на заготовку, на конец текущего шага по времени неизвестно и зависит от взаимного положения в пространстве режущего инструмента и обрабатываемой заготовки в тот же момент времени. В то же время взаимное расположение инструмента и заготовки на конец текущего шага по времени определяется не только движениями подачи инструмента, но и вибрациями заготовки, зависящими от закона изменения внешних сил за шаг по времени. Для решения нелинейной системы дифференциальных уравнений движения (1) применяется итерационная процедура, основанная на методе простой итерации.

После проведения итерационной процедуры решения нелинейной системы дифференциальных уравнений движения (1) в блоке геометрического моделирования производится изменение геометрической модели обрабатываемой заготовки в соответствии с параметрами срезаемого слоя материала. Изменение поверхности при моделировании динамики фрезерования с учетом возникающих в динамической системе вибраций позволяет естественным образом учитывать регенеративный эффект, приводящий к потере динамической устойчивости установившегося процесса резания для определенных технологических режимов обработки.

Результатами имитационного численного моделирования динамики фрезерования являются законы изменения во времени сил резания, действующих по задней и передней поверхностям зубьев режущего инструмента, суммарных сил резания, колебаний податливой заготовки, а также геометрия обработанной поверхности заготовки с учетом вибрационных отметин, оставленных режущим инструментом. Полученные результаты моделирования могут быть использованы для определения виброустойчивых рациональных режимов обработки.

**В третьей главе** приведены результаты верификации разработанной модели динамики фрезерования. В качестве данных для проведения

верификации были использованы результаты из работы Sellmeier (2012). В данной работе производилось расчетное и экспериментальное исследование динамики трехкоординатного концевого фрезерования паза в заготовке из алюминиевого сплава AL 7075 T651, жестко закрепленной на платформе с упругим основанием – упругом столике.

Для исследования влияния контактного взаимодействия по задней поверхности режущего клина инструмента на динамику концевого фрезерования в работе Sellmeier (2012) использовались фрезы с фасками различной ширины, нанесенными на заднюю поверхность.

Расчетные данные в работе Sellmeier (2012) были получены на основе аналитического исследования устойчивости процесса фрезерования в частотной области – была использована плоская модель динамики фрезерования: рассматривались колебания как упругого столика, так и фрезы в плоскости, перпендикулярной оси инструмента. Для решения уравнений динамики технологической системы был использован метод главных координат: учитывались 33 собственные формы инструмента и обрабатываемой заготовки, связанные с изгибами колебаниями в плоскости поверхности упругого столика.

Результаты исследования динамики процесса фрезерования из работы Sellmeier (2012) приведены на Рис. 4 в форме карт виброустойчивости режимов обработки, построенных в координатах технологических параметров: скорости вращения шпинделя и осевой глубины резания. Зелеными непрерывными линиями изображены границы устойчивости, полученные из аналитического исследования устойчивости процесса фрезерования в частотной области. Цветными квадратами изображены результаты экспериментального исследования для отдельных режимов обработки: темно-красными квадратами изображены режимы обработки, при которых происходит потеря устойчивости установившегося процесса резания, зеленые квадраты соответствуют виброустойчивым режимам фрезерования.

Разработанная в рамках настоящей диссертационной работы модель динамики фрезерования была использована для проведения многовариантного имитационного моделирования динамики процесса резания, описанного в работе Sellmeier (2012). Варьируемыми параметрами являлись: скорость вращения шпинделя, осевая глубина резания и ширина фаски на задней поверхности режущего клина фрезы. Результаты проведенного имитационного моделирования нанесены на ту же координатную сетку (Рис. 4) в форме цветных кругов: зеленым цветом обозначены виброустойчивые режимы обработки, красным – неустойчивые режимы, желтым – пограничные режимы. Для оценки виброустойчивости режима фрезерования по результатам имитационного моделирования динамики обработки резанием во времени использовался следующий критерий: режим обработки признается виброустойчивым в случае, если в спектрах установившихся колебаний заготовки и инструмента присутствуют только гармоники, кратные частоте прохождения режущих кромок фрезы (т.е. отсутствуют колебания типа «чаттер»).

Результаты, полученные с использованием разработанной имитационной

модели динамики фрезерования, показали хорошее качественное соответствие как экспериментальным данным, так и результатам аналитического исследования устойчивости установившегося процесса фрезерования в частотной области (Рис. 4).

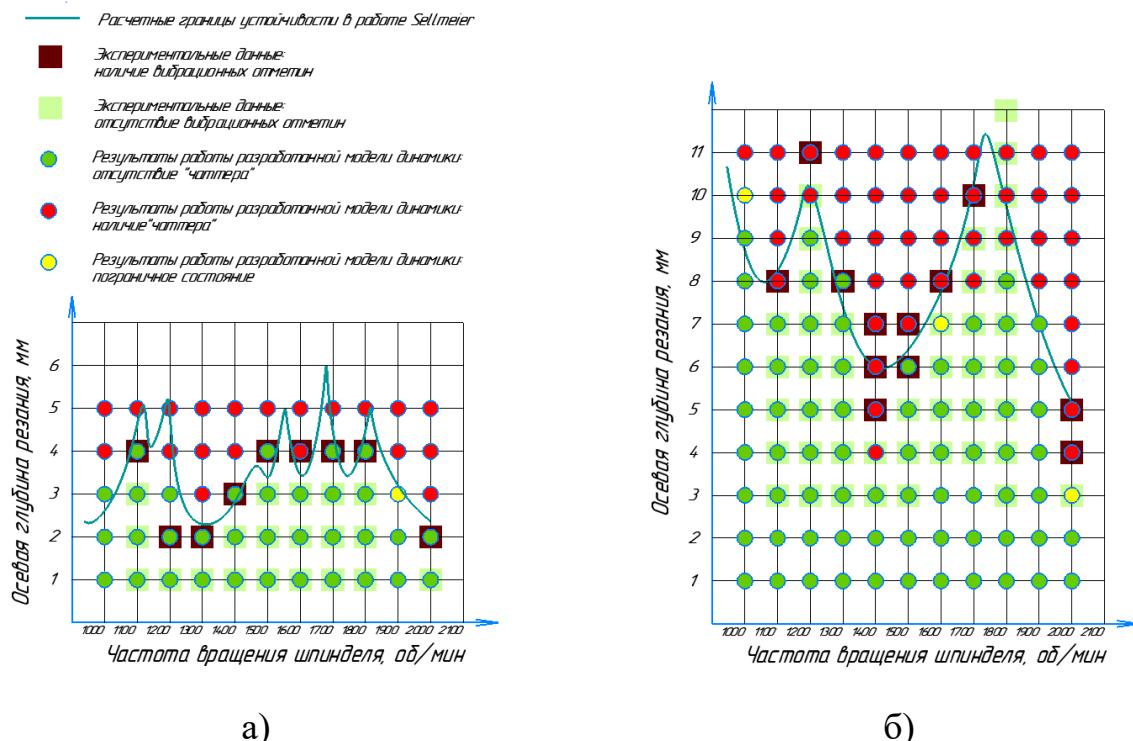


Рис. 4. Сравнение результатов применения разработанной имитационной модели с расчетными и экспериментальными данными из открытых литературных источников: а) в случае отсутствия фаски на задней поверхности фрезы; б) при наличии фаски шириной 50 мкм

**В четвёртой главе** представлены результаты имитационного многовариантного моделирования динамики многокоординатного концевого фрезерования податливой заготовки с условиями резания, соответствующими чистовому фрезерованию тонкостенных деталей ГТД. Обрабатываемой заготовкой является пластина из алюминиевого сплава, консольно закрепленная с одного из своих краев (Рис. 5). В качестве инструмента используется концевая сферическая фреза. Вектор оси концевой фрезы составляет с осью Y глобальной СК угол 30° и сохраняется постоянным в процессе обработки. Траектория движения инструмента построена таким образом, что после фрезерования на поверхности заготовки образуется дорожка, параллельная оси X.

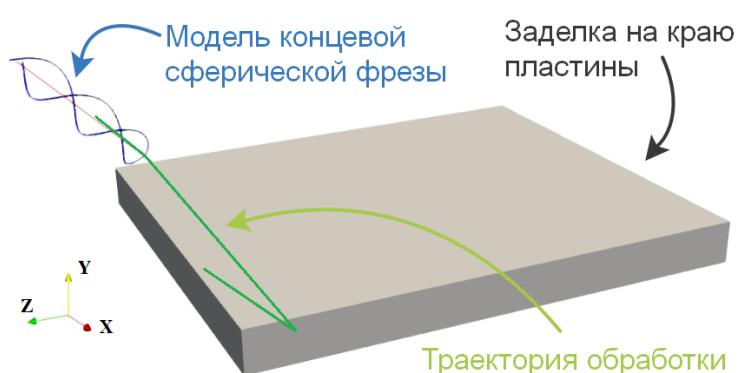


Рис. 5. Схема обработки концевым фрезерованием в численном эксперименте

При моделировании динамики обрабатываемой заготовки с использованием метода главных координат (2) учитывались первые пять собственных форм заготовки (Рис. 6): количество учитываемых собственных форм определялось таким образом, чтобы наивысшая учитываемая собственная частота десятикратно превышала наибольшую рассматриваемую частоту внешнего возбуждения (частоту прохождения режущих кромок).

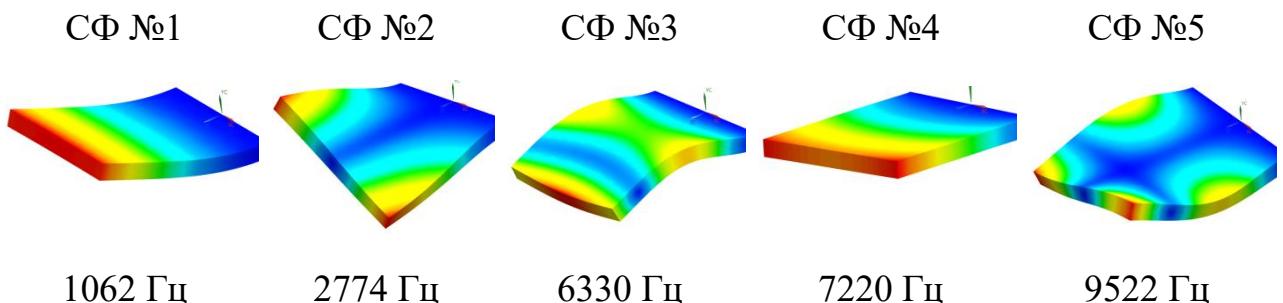


Рис. 6. Собственные частоты и собственные формы заготовки

В качестве варьируемых параметров были выбраны значения относительной частоты вращения шпинделя, а также геометрические параметры режущего клина концевой фрезы. Относительная частота вращения шпинделя равняется количеству колебаний, которое успевает сделать заготовка на своей первой собственной частоте за период прохождения одной режущей кромки фрезы:

$$\omega_{rel} = \frac{60 \cdot p_1}{m \cdot \omega}, \quad (8)$$

где  $\omega_{rel}$  – относительная частота вращения шпинделя;

$p_1$  – первая собственная частота заготовки, Гц;

$m$  – количество режущих кромок фрезы;

$\omega$  – размерная частота вращения шпинделя, об/мин.

Показано, что учет сил контактного взаимодействия по задней поверхности режущего инструмента (демпфирования процесса) при проведении имитационного моделирования динамики обработки фрезерованием приводит к следующим эффектам в широком диапазоне используемых частот вращения шпинделя:

- отсутствию вибрационных отметин на итоговой поверхности заготовки после фрезерования (Рис. 7);

- уменьшению расчетных амплитуд колебаний заготовки (Рис. 8,а,б);

- изменению характера колебательного движения податливой заготовки (Рис. 8,в,г): при учете сил взаимодействия по задней поверхности

фрезы в спектре колебаний заготовки присутствуют только гармоники, кратные частоте возбуждения (вынужденный характер колебаний), а при отсутствии учета данных сил в спектре колебаний заготовки возникает ведущая гармоника, не кратная частоте возбуждения и находящаяся в окрестности первой собственной частоты системы (колебания типа «чаттер»);

- уменьшению суммарных сил резания;
- увеличению виброустойчивости процесса фрезерования вдоль всего маршрута обработки (Рис. 9,а,б).

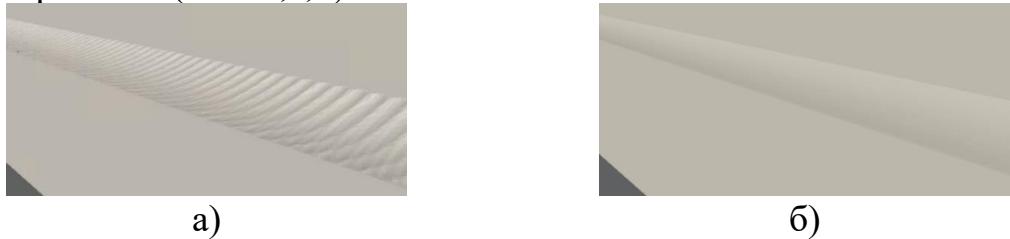
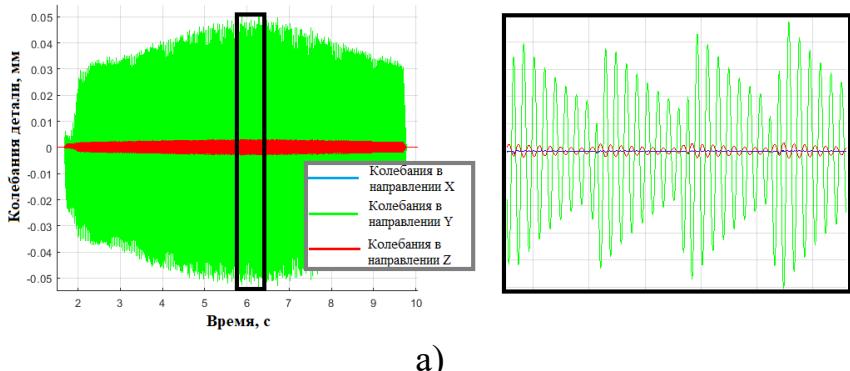
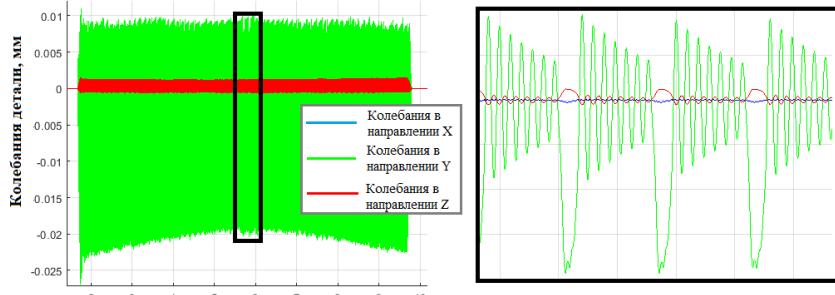


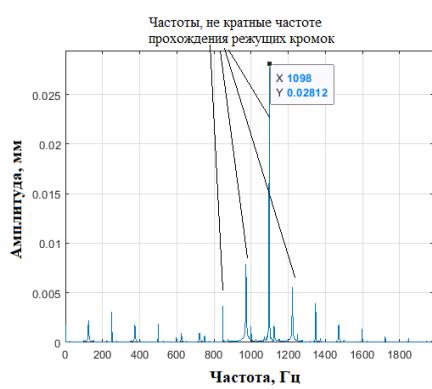
Рис. 7. Модель поверхности заготовки после фрезерования на режиме  $\omega_{rel} = 8,5$  : а), б) с учетом и без учета демпфирования процесса



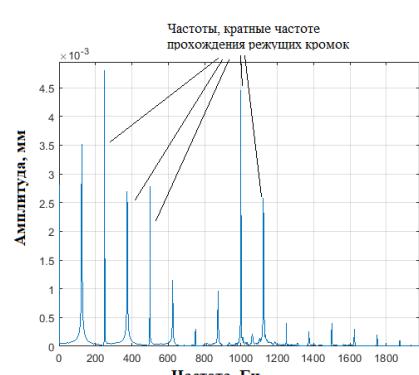
а)



б)



в)



г)

Рис. 8. Результаты моделирования динамики концевого фрезерования для режима  $\omega_{rel} = 8,5$ : а), б) колебания заготовки с учетом и без учета демпфирования процесса; в), г) спектры колебаний заготовки в направлении Y с учетом и без учета демпфирования процесса

Доказано, что увеличение заднего угла режущего клина концевой фрезы приводит к уменьшению интенсивности контактного взаимодействия по задней поверхности инструмента и, как следствие, уменьшению виброустойчивости процесса фрезерования (Рис. 9). Показано, что интенсивность контактного взаимодействия по задней поверхности режущего клина концевой фрезы зависит от используемой частоты вращения шпинделя и увеличивается с уменьшением отношения частоты прохождения режущих кромок к собственной частоте динамической системы.

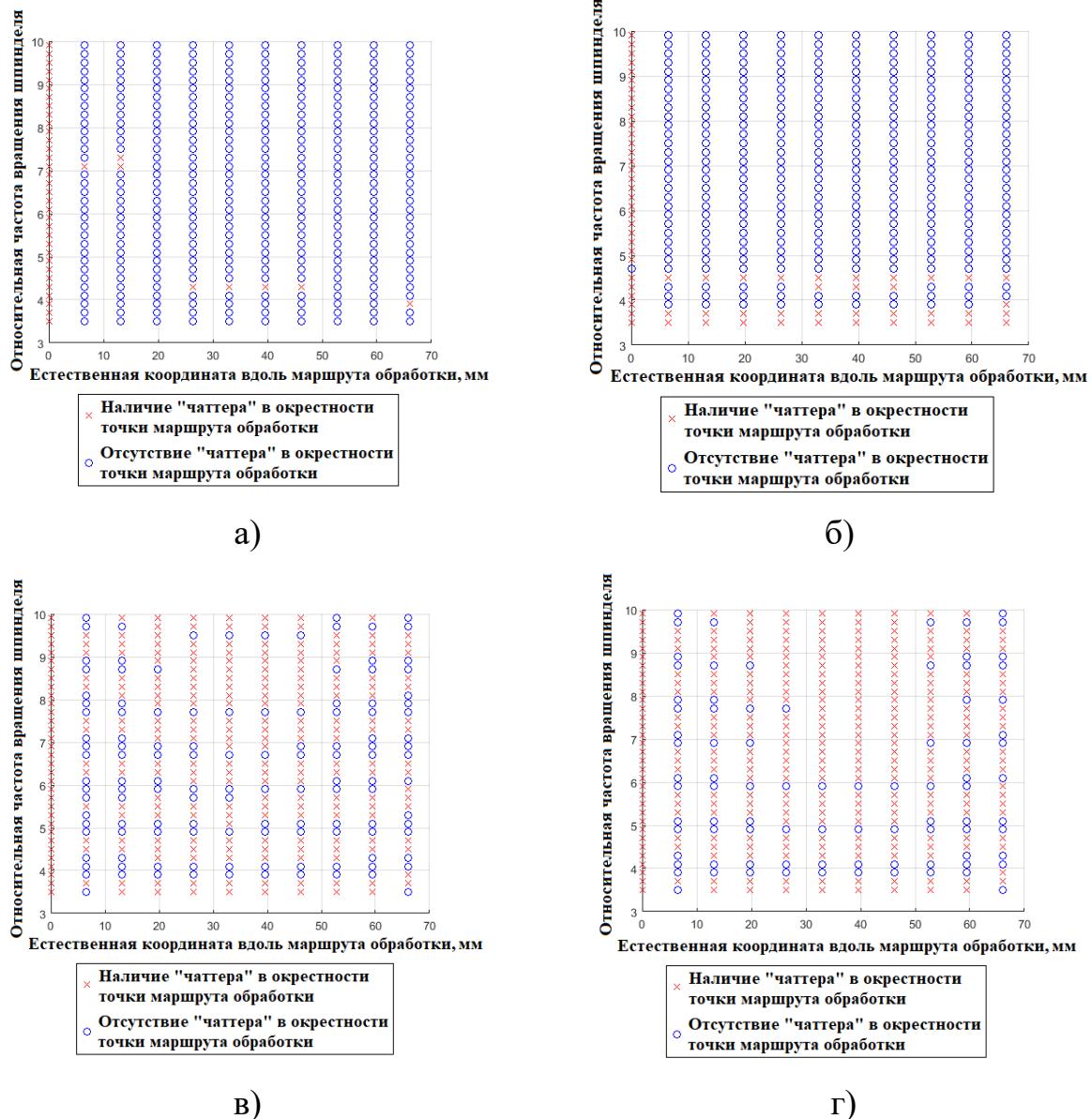


Рис. 9. Расчетные карты виброустойчивости процесса фрезерования вдоль траектории маршрута обработки для различных значений заднего угла режущего клина концевой фрезы: а)  $\gamma = 1^\circ$ ; б)  $\gamma = 3^\circ$ ; в)  $\gamma = 5^\circ$ ; г) без учета сил контактного взаимодействия по задней поверхности фрезы

### Основные результаты и выводы

1. Разработана методика численного моделирования во временной области динамики многоосевого фрезерования податливых деталей, учитывающая

нелинейность динамической системы, контактное взаимодействие между фрезой и обрабатываемой деталью по передней и задней поверхностям зубьев режущего инструмента, а также эффект регенерации поверхности.

2. Разработан алгоритм и программа для анализа динамики процесса многоосевого фрезерования податливых деталей из труднообрабатываемых сплавов, позволяющая:
  - рассчитывать временные законы колебательного движения обрабатываемой детали в процессе обработки фрезерованием, сил резания, действующих по передней и задней поверхностям режущих зубьев фрезы, а также совокупных сил резания;
  - рассчитывать пространственное распределение сил контактного взаимодействия режущего клина и обрабатываемой детали в каждый дискретный момент времени в процессе обработки;
  - получать геометрическую модель обработанной поверхности заготовки, учитывающую упругие отжатия и вибрационные отметины, после проведения обработки фрезерованием;
  - выбирать рациональные режимы обработки по критерию производительности технологического процесса за счет проведения многовариантных расчетов при изменении технологических параметров.
3. Проведена верификация разработанной модели динамики на примере трехкоординатного концевого фрезерования паза по экспериментальным данным, а также результатам аналитического исследования устойчивости установившегося процесса резания в частотной области из открытых литературных источников.
4. Проведено исследование влияния контактного взаимодействия по задней поверхности зубьев режущего инструмента на динамику процесса 4-х координатного концевого фрезерования для наборов технологических параметров режима обработки и геометрических параметров режущего клина инструмента.
5. Показано, что учет контактного взаимодействия по задней поверхности зубьев режущего инструмента при моделировании динамики многокоординатного фрезерования приводит к увеличению областей виброустойчивых технологических режимов обработки, уменьшению рассчитываемых сил резания, действующих на режущий инструмент и обрабатываемую деталь, и амплитуд колебаний податливой детали до 50%. Проявление перечисленных эффектов тем выше, чем больше отношение собственной частоты динамической системы к частоте прохождения режущих кромок.
6. Показано, что интенсивность контактного взаимодействия по задней поверхности зубьев режущего инструмента и, как следствие, демпфирующее воздействие на динамическую систему увеличивается с уменьшением заднего угла режущего клина фрезы.
7. В дальнейшем использование разработанной модели динамики

многокоординатного фрезерования податливых деталей позволит увеличивать производительность обработки за счет назначения высокопроизводительных режимов резания на основе анализа результатов многовариантного численного моделирования динамики процесса с варьированием технологических параметров, а также подбирать оптимальную форму режущего клина из условия удовлетворения ограничений, накладываемых на качество процесса обработки.

### **Список публикаций по теме диссертации**

1. Обзор литературных источников по моделированию динамики процесса сверления / Н.А. Жуков [и др.] //Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. Эл № ФС 77-48211. 2015. № 12. С. 240-265. (3,25 п.л./0,6 п.л.)
2. Kiselev I., Zhukov N., Deev K. Automated block-by-block correction of milling parameters by means of numerical simulation //MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 224, Is. 01086. P. 1-7. (0,875 п.л./0,3 п.л.)
3. Жуков Н.А., Киселев И.А. Оценка адекватности феноменологических моделей усилий резания //Механика и математическое моделирование в технике. 2017. С. 129-134. (0,75 п.л./0,5 п.л.)
4. Zhukov N., Kuts V., Suldin B. Investigation of the plain milling process dynamic stability taking into account the contact interaction on the flank face of the cutting wedge //MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 224, Is. 01050. P. 1-6. (0,75 п.л./0,4 п.л.)
5. Жуков Н.А., Киселёв И.А. Исследование влияния сил контактного взаимодействия по задней поверхности режущего зуба на динамику концевого фрезерования //Труды МАИ. ЭЛ № ФС 77-69492. 2022. №. 123. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=165214> (дата обращения 16.04.2023). (3,5 п.л./2,5 п.л.)
6. Жуков Н.А., Киселёв И.А. Учет демпфирования процесса при моделировании динамики плоского фрезерования //IV Международная школа-конференция молодых учёных «Нелинейная динамика машин» School-NDM: сборник трудов. М.: Изд-во ИМАШ РАН. 2017. С. 250-252. (0,19 п.л./0,1 п.л.)
7. Three-dimensional modeling of deep hole vibratory drilling dynamics / N.A. Zhukov [et al.] //Procedia Engineering. 2017. Vol. 176. P. 50-55. (0,75 п.л./0,15 п.л.)
8. Cutter's flank face interaction in modeling of plain milling process / N.A. Zhukov [et al.] //Материалы третьей международной научно-технической конференции «Динамика и вибраакустика машин (ДВМ 2016)». 2016. Р. 197-199. (0,4 п.л./0,2 п.л.)
9. Программа для моделирования динамики пространственной фрезерной обработки сложнопрофильных деталей «NuMach-DynM»: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022616836 Рос. Федерация; заявл. 25.03.2022 ; опубл. 15.04.2022.