

На правах рукописи



Николаев Сергей Михайлович

**Идентификация параметров моделей динамики сложногопрофильных
деталей при обработке фрезерованием**

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Москва - 2017

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: **Козочкин Михаил Павлович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры высокоэффективных технологий обработки, ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (МГТУ «СТАНКИН»)

Шохин Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории вибромеханики, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН).

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие Центральный научно-исследовательский институт машиностроения (ФГУП ЦНИИмаш)

Защита состоится 18 октября 2017г. 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, 2-я Бауманская ул., 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. Телефон для справок: +7(499)263-66-39.

Автореферат разослан « » июля 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук

Карпачев А.Ю.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. На сегодняшний день в практику большинства машиностроительных предприятий, занимающихся производством тонкостенных сложнопрофильных деталей внедрен подход численного моделирования процесса обработки на основе CAD/CAM – систем. Стоит отметить, что ни в одном коммерческом программном комплексе нет возможности учитывать динамические эффекты, неизбежно возникающие при фрезеровании указанных деталей, выполненных из труднообрабатываемых сплавов, таких как лопатки газотурбинных двигателей, моноколеса, блинги, корпусные детали. Для решения проблемы выбора рациональных режимов обработки и минимизации негативных вибраций (так называемый «чаттер») необходимо исследовать динамику процесса фрезерования с помощью имитационного моделирования. Несмотря на большое количество работ в данной области на текущий момент существует лишь несколько методик, позволяющих выполнять имитационное моделирование динамики процесса фрезерования сложнопрофильных деталей и обоснованно выбирать виброустойчивые режимы обработки (Y. Altintas, F. Klocke, P. Lorong, Гуськов А.М., Киселев И.А., Воронов С.А.).

Однако, решению задачи идентификации параметров моделей динамики заготовки и инструмента уделено недостаточное внимание. При этом, для получения корректных результатов моделирования и обоснованного выбора рациональных режимов обработки решение данной задачи необходимо. Особенно актуальной данная проблема становится при исследовании динамики фрезерования сложнопрофильных тонкостенных деталей из труднообрабатываемых материалов.

Параметры модели динамики заготовки и инструмента, всегда в той или иной степени отличаются от соответствующих экспериментальных значений. Это связано с наличием неопределенности свойств мест соединений заготовки и оснастки, а также с влиянием жёсткости станка на динамические характеристики инструмента/детали. Из этого факта вытекает необходимость верификации и уточнения конечно-элементных моделей конструкций технологической системы на основе результатов экспериментальных исследований их динамических характеристик. Параметры демпфирования, определяющие коэффициенты динамичности системы и оказывающие влияние на динамику процесса, могут быть получены только с помощью методов экспериментального модального анализа, при этом стоит отметить, что собственные частоты колебаний и коэффициенты модального демпфирования заготовки меняются в процессе обработки.

Таким образом, актуальность работы определяется необходимостью решения важной прикладной научно-технической задачи, посвященной

идентификации и уточнению параметров численных моделей динамики детали и инструмента для выбора рациональных режимов обработки фрезерованием.

Цели и задачи работы: разработка универсальной методики идентификации и уточнения математических моделей динамики детали/инструмента для создания новых инструментальных средств проектирования производственных процессов обработки фрезерованием, обеспечивающих высокую точность и качество получаемых деталей.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- 1) Разработка методики модальных испытаний заготовки в процессе обработки для анализа изменения её динамических характеристик;
- 2) Разработка методики и программного обеспечения для идентификации параметров моделей динамики заготовок сложногопрофильных деталей и инструмента с помощью методов экспериментального модального анализа и методов уточнения конечно-элементных моделей;
- 3) Апробация разработанной методики и подхода имитационного моделирования динамики фрезерования для выбора рациональных режимов обработки тестовой детали, имеющей форму лопатки компрессора газотурбинного двигателя, обеспечивающих высокое качество поверхности.

Методы исследования. Для решения задачи моделирования динамики процесса фрезерования сложногопрофильных деталей использован метод конечных элементов в объемной постановке в сочетании с геометрическим алгоритмом для моделирования образования новых поверхностей при фрезеровании (Киселев И. А). Для экспериментального определения динамических характеристик заготовки использован метод стохастической идентификации подпространств (Van Overshee P.), обеспечивающий максимальную точность идентификации коэффициентов демпфирования. Уточнение конечно-элементной модели заготовки по результатам модального анализа выполнено с применением подходов эволюционной топологической оптимизации. Задача детектирования «чаттера» по результатам моделирования динамики процесса фрезерования решалась с помощью комбинации классического и сингулярного спектрального анализа.

Научная новизна.

1. На основе модальных испытаний разработан метод определения динамических характеристик тонкостенных сложногопрофильных деталей, изменяющихся в процессе их обработки фрезерованием.

2. Установлено влияние изменяющихся в процессе обработки собственных частот колебаний и коэффициентов демпфирования заготовки на динамику фрезерования.

3. На основе подхода эволюционной оптимизации разработан метод уточнения конечно-элементной модели заготовки, необходимый для получения достоверных моделей динамики детали при её обработке фрезерованием.

4. Разработан метод выбора рациональных режимов фрезерования, позволяющих минимизировать негативное влияние вибраций при обработке на точность и качество получаемых деталей.

Достоверность результатов. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций работы обоснована:

1. Применением классических подходов и методов механики деформируемого твердого тела, теории колебаний и экспериментальной механики.

2. Проверкой разработанных алгоритмов и программ на модельных и тестовых задачах.

3. Удовлетворительным совпадением результатов моделирования динамики фрезерования, полученных с использованием уточненной модели, с результатами натурных экспериментов.

4. Опытом практического применения достигнутых результатов в филиале «НИИД» АО «НПЦ газотурбостроения «Салют».

Практическая ценность работы. Создан пакет программ для идентификации динамических характеристик механических конструкций по результатам модальных испытаний и уточнения их конечно-элементных моделей. Разработанные программы могут быть использованы на машиностроительных предприятиях для получения достоверных моделей динамики конструкций, а также для имитационного моделирования динамических процессов обработки фрезерованием. Разработан метод и программное обеспечение для обработки результатов численного моделирования динамики фрезерования с целью выявления благоприятных и неблагоприятных с точки зрения возникновения «чаттера» режимов обработки. Решена задача выбора виброустойчивых режимов фрезерования тестовой сложнопрофильной тонкостенной детали, имеющей форму лопатки компрессора газотурбинного двигателя.

Реализация работы. Результаты диссертационной работы и разработанное программное обеспечение внедрены в практику экспериментальных исследований динамики процесса фрезерования деталей газотурбинных двигателей в филиале «НИИД» АО «НПЦ газотурбостроения «Салют», а также используются для модальных

испытаний на предприятиях ФГУП ЦИАМ, НИИСФ РААСН, ВПК «НПО Машиностроения».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и были одобрены на 5-ой международной конференции «Проблемы механики современных машин» (Улан-Удэ, 2012), на 5-ой международной конференции IOMAC по операционному модальному анализу (г. Portugal, Guimaraes, 2013), на XXXIX академических чтениях по космонавтике. (г. Реутов, 2014), на 18-ой международной конференции Vibroengineering (г. Poland, Katowice, 2014), на конференции «Современные методы испытаний авиационной техники» в рамках 13-ой Международной выставки испытательного и контрольно-измерительного оборудования (Москва, 2015), на 3-ей международной конференции «Динамика и виброакустика машин» (г. Самара, 2016).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 7 из них в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК РФ и 3 статьи в зарубежных научных изданиях, входящих в базу Scopus

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 184 листах машинописного текста, включая 96 рисунков и 5 таблиц. Библиография работы содержит 129 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель научного исследования, задачи, научная новизна и практическая ценность работы. Приведено краткое содержание работы по главам.

В первой главе приводится обзор и анализ литературы, посвящённой методам экспериментального модального анализа и уточнения моделей, а также расчетным и экспериментальным методам исследования динамики фрезерования сложнопрофильных деталей.

Базовые работы по идентификации модальных параметров в частотной и временной области связаны с именами таких учёных, как: Бернс В.А, Смыслов В.И., Хомяков В.С, Микишев Г.Н, D. Bishop, Richardson M., Allemang R., Brown D., Rixen D., Peeters B., Zimmerman R., Ewins D., Sas P., Heylen W. и др. Основной проблемой при решении задачи экспериментального модального анализа является корректное определение коэффициентов демпфирования в системе. Для решения этой проблемы Р. Van Overschee и В. De Moog был разработан метод стохастической идентификации подпространств, работающий во временной области и не требующий информации о воздействии на систему. Основы методов уточнения конечно-элементных моделей заложены в работах Huang X.,

Friswell M., Motterhead J. и развивались в трудах Dascotte E., Троицкого А., Межина В. и др. Изучением динамики процесса фрезерования занимались Altintas Y., Stepan G., Insperger T., Гуськов А., Воронов С., Киселёв И., Tlustý J., Budak E. и др, а экспериментальными методами анализа вибраций при обработке и детектированием «чаттера» Dijk N., Faasen R., Козочкин М., Сабиров Ф., Yao Z и др. Авторами Киселёв И., Воронов С., Гуськов А., Lorong P. показано, что комплексная имитационная модель процесса пространственного фрезерования включает в себя модель динамики детали и инструмента, представленная системой нелинейных неоднородных дифференциальных уравнений второго порядка с переменными коэффициентами.

Одной из проблем применения подхода имитационного моделирования процесса фрезерования для выбора режимов обработки является необходимость идентификации параметров моделей динамики детали и инструмента. Данные модели, в большинстве случаев, полученные с помощью метода конечных элементов, всегда содержат в себе некоторые неточности, неизвестные заранее. Одним из главных источников неточности при моделировании является неопределенность свойств мест крепления заготовки к технологической оснастке и отличие формы реальной заготовки от её геометрической модели вследствие разброса параметров предварительных этапов технологического процесса. Одной из важных проблем также является корректное определение динамических характеристик заготовки (собственные частоты колебаний и коэффициенты демпфирования) с учётом их изменения в процессе фрезерования.

Для решения данных задач в диссертации разработана методика экспериментального модального анализа и уточнения конечно-элементной модели заготовки и инструмента, позволяющая повысить достоверность результатов моделирования процесса фрезерования, используемых для выбора рациональных режимов. Также, для автоматизации выбора параметров обработки (скорость вращения шпинделя) предложена методика построения диаграмм виброустойчивых режимов.

Во второй главе рассмотрены методы идентификации модальных параметров заготовки в процессе обработки, выполнен анализ и сопоставление точности алгоритмов идентификации модальных параметров, работающих в частотной и временной области, а также приведены результаты применения методики на примере заготовки лопатки компрессора.

В рамках работы для верификации был использован метод ширины пика и метод стохастической идентификации (SSI) на тестовом примере. Апробация выполнена с целью сравнения методов идентификации модальных параметров механических систем при ударном тестировании или при воздействии неизвестных импульсных нагрузок (возникающих при

фрезеровании). Метод «ширины пика» является одним из наиболее распространенных и простых методов идентификации коэффициентов демпфирования, а метод SSI является наиболее современным методом операционного модального анализа (de Moor, Van Overschsee). В качестве тестового примера использовано решение для системы с известными характеристиками. Как известно, динамический отклик механической системы ($x(t)$) в некоторой точке на импульсное воздействие можно выразить как:

$$x(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cdot e^{-2f_i\zeta_i t} \cdot \sin(2\pi f_i t) \quad (1)$$

где N — порядок системы, f_i — собственные частоты колебаний, ζ_i — коэффициенты демпфирования, A_i — амплитуды колебаний на каждой собственной форме, t — время.

Будем считать, что указанные параметры системы являются случайными величинами и принадлежат заданному интервалу с равномерным распределением. В результате анализа, выполненного в статистической постановке, получены графики, отражающие точность идентификации при использовании рассматриваемых методов (Рис. 1).

Как видно из графиков метод «ширины пика» обеспечивает приемлемую степень точности идентификации при демпфировании от 1% до 3 %, в долях от критического, а при более низком и более высоком демпфировании погрешность идентификации резко возрастает. Погрешность метода «ширины пика» в случае низкого (< 1%) демпфирования обусловлена недостаточным спектральным разрешением, а в случае относительно высокого демпфирования (>5%) связана с несимметричностью резонансного пика. При этом точность результатов, полученных с помощью метода стохастической идентификации подпространств (SSI) не зависит от величины демпфирования в рассматриваемых пределах. Также в работе показано, что алгоритм стохастической идентификации более устойчив к зашумленности сигнала и позволяет идентифицировать близкие собственные формы колебаний. Подобные результаты были получены в работах Peeters B., Zhang L., однако в статистической постановке получены впервые.

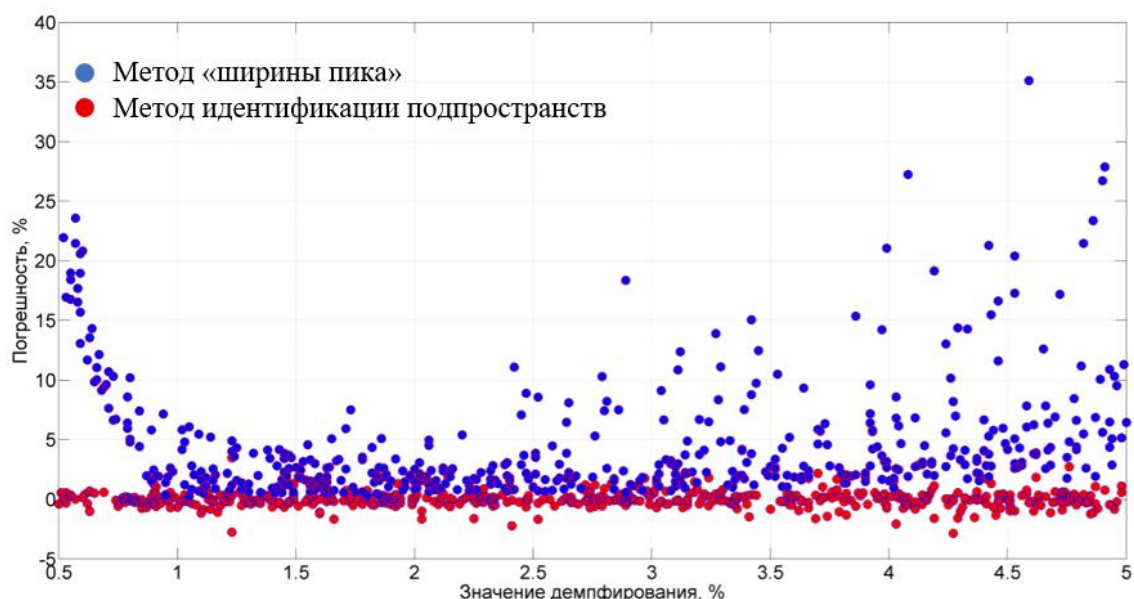


Рис. 1. Статистическая зависимость погрешности идентификации демпфирования от величины искомого коэффициента демпфирования для двух алгоритмов идентификации

Методика и программное обеспечение для выполнения модальных испытаний и идентификации модальных параметров использованы для исследования изменения динамических характеристик заготовки, выполненной в форме лопатки газотурбинного двигателя (ГТД), в процессе чистовой фрезерной обработки (Рис. 2).

Заготовка выполнена из алюминиевого сплава Д16Т. Обработка выполнена на обрабатывающем центре DMG Ultrasonic 10, при подаче 450 мм/мин. Припуск на чистовую обработку составил 100 мкм. Для чистовой обработки использована сфероконическая двузубая фреза. Для проведения модальных испытаний использован АЦП National Instrument, USB-4431, измерительный молоток Bruel&Kjaer 8206, лазерный виброметр Polytec PDV 100, а также программа для сбора и анализа данных, разработанная автором в среде LabView.

Основной задачей исследования является анализ изменения динамических характеристик в процессе обработки (Рис. 3). Для идентификации модальных параметров использован метод стохастической идентификации подпространств. Для анализа изменения динамических характеристик заготовки в процессе обработки через равное количество точек маршрута многократно выполнялся отвод инструмента и проводилось ударное тестирование.

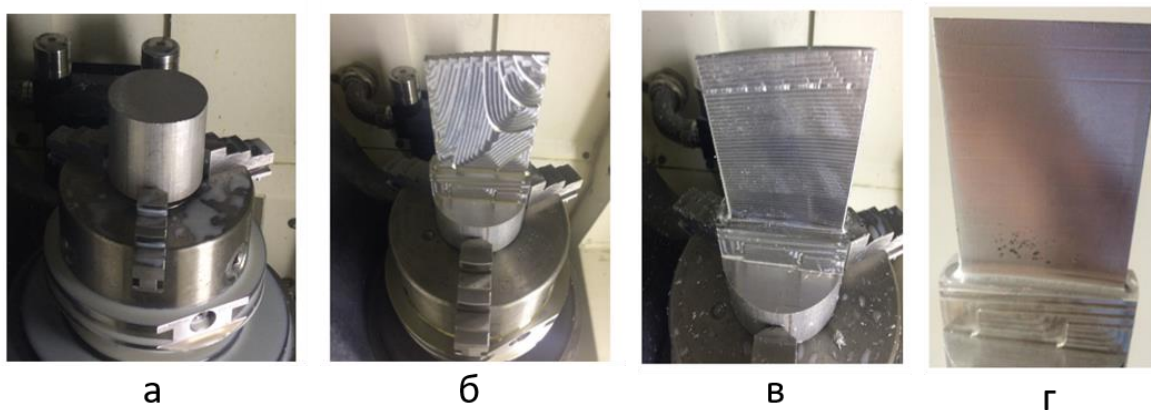


Рис. 2. Заготовка на различных стадиях обработки (а – исходная заготовка, б – заготовка после черновой обработки, в – заготовка после получистовой обработки, г – обработанная деталь)

В процессе чистовой обработки выполнено 10 измерений. В результате анализа были получены графики изменения динамических характеристик в процессе чистовой обработки лопатки в зависимости от пройденного пути маршрута обработки (Рис. 4).



Рис. 3. Схема проведения модальных испытаний заготовки лопатки

Коэффициенты демпфирования заготовки существенно влияют на устойчивость процесса обработки, и их корректное определение необходимо для получения достоверных результатов моделирования. Установлено, что наряду с изменением собственных частот коэффициенты модального демпфирования также изменяются. Для анализа изменения коэффициентов демпфирования в процессе обработки построены регрессионные зависимости коэффициентов модального демпфирования от значения собственной частоты $\zeta(f)$ (Рис. 5):

$$\zeta(f) = p_1 \cdot \left(\frac{f}{f_{ref}}\right)^n + p_2 \cdot \left(\frac{f}{f_{ref}}\right)^{n-1} + \dots + p_n \cdot \left(\frac{f}{f_{ref}}\right) + p_{(n+1)} \quad (2)$$

где n – порядок полинома, f – частота, f_{ref} – опорное значение частоты (среднее значение рассматриваемого частотного диапазона), $p_i, i \in 1..n + 1$ – параметры полинома.

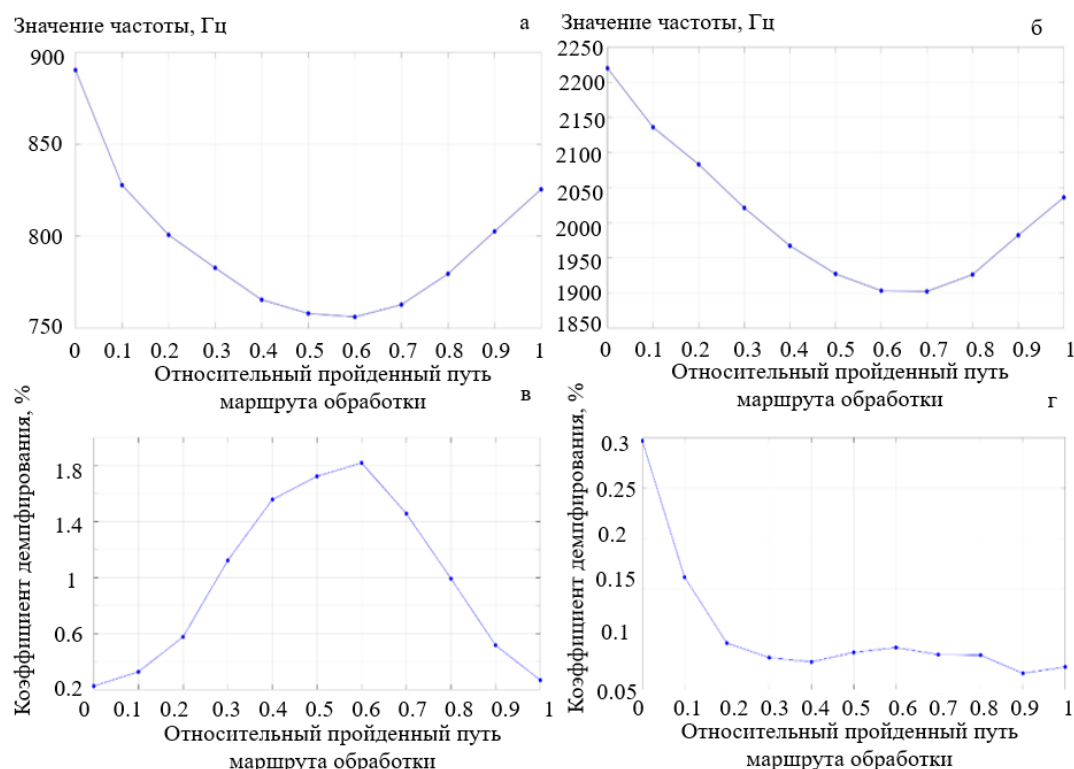


Рис. 4. Графики изменения двух первых собственных частот колебаний (а, б) и соответствующих коэффициентов демпфирования (в, г) при чистовой обработке

Полученные результаты используются для моделирования динамики в процессе фрезерования заготовки.

В третьей главе представлен новый метод уточнения конечно-элементной модели на основе подхода эволюционной оптимизации, а также программная реализация метода, приведены результаты уточнения моделей заготовок лопаток ГТД. Под уточнением конечно-элементной модели в рамках данной работы понимается минимизация невязки между результатами расчета собственных частот колебаний и экспериментальными значениями собственных частот конструкции. В основе уточнения модели по результатам экспериментального модального анализа лежит метод многопараметрической оптимизации и анализ чувствительности собственных частот колебаний к вариации параметров упругости в конкретных конечных элементах модели. Согласно методу

параметры упругости в каждом конечном элементе модели определяются из соотношения:

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{P}_{i-1} + \mathbf{S}^+(\mathbf{f}_i - \mathbf{f}^{exp}) \quad (3)$$

Здесь \mathbf{P}_i , \mathbf{P}_{i-1} – вектора параметров модели на текущей и предыдущей итерации алгоритма уточнения; \mathbf{f}_i , \mathbf{f}^{exp} – вектора расчетных и экспериментальных значений собственных частот колебаний, \mathbf{S}^+ – псевдообратная матрица чувствительности.

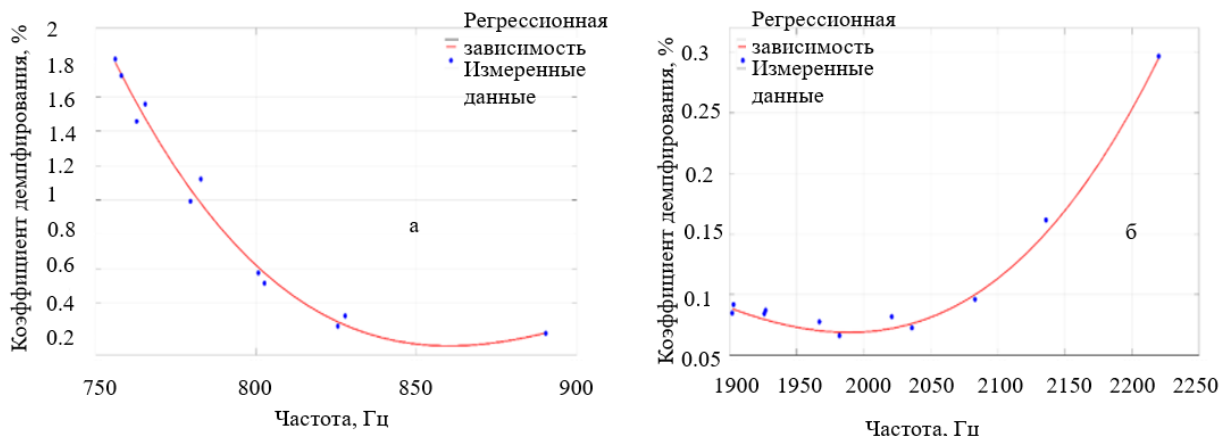


Рис. 5. Регрессионные зависимости коэффициентов демпфирования от частоты для первой (а) и второй (б) форм колебаний

Отличительной особенностью метода уточнения модели, используемом в данной работе является возможность аналитически найти коэффициенты чувствительности собственных частот колебаний к изменению приведенных параметров упругости в каждом конечном элементе модели. Для этого использован подход эволюционной топологической оптимизации. Элементы матрицы чувствительности \mathbf{S} определяются как:

$$s_i^e = \frac{\omega_i^2}{m_i E_e} (\mathbf{q}_i^e)^T \mathbf{K}^e \mathbf{q}_i^e \quad (4)$$

Здесь s_i^e – коэффициент чувствительности элемента e соответствующий собственной форме i , ω_i – собственная частота, m_i – модальная масса i – ой собственной формы, \mathbf{q}_i^e – вектор i – ой собственной формы, соответствующий степеням свободы конечного элемента e , \mathbf{K}^e – матрица жёсткости элемента, E_e – текущее значение приведенного модуля упругости в элементе.

Алгоритм метода уточнения реализован автором в программном коде, в среде Matlab. Программа позволяет уточнять модель сразу по нескольким собственным частотам колебаний, а также включает процедуру

автоматического разбиения вектора параметров на кластеры для снижения размерности задачи.

Конечно-элементная модель рассматриваемой заготовки построена с помощью 10-узловых тетраэдров и состоит из 150 000 узлов. Динамика рассматриваемой детали во время фрезерования, в основном, определяется двумя первыми собственными формами колебаний (Рис. 6). Решение задачи на собственные значения выполнено с помощью метода итераций подпространств в ПО 3DCUT.

В ПО 3DCUT предусмотрена возможность построения конечно-элементной модели заготовки с учетом снятия материала. В рамках методики моделирования каждый кадр перестроения конечно-элементной сетки соответствует определённой точке маршрута обработки. Для рассматриваемой детали сделано 20 кадров, равномерно распределенных по длине маршрута чистовой обработки. С помощью разработанной программы решена задача уточнения конечно-элементной модели заготовки лопатки ГТД (Рис. 7).

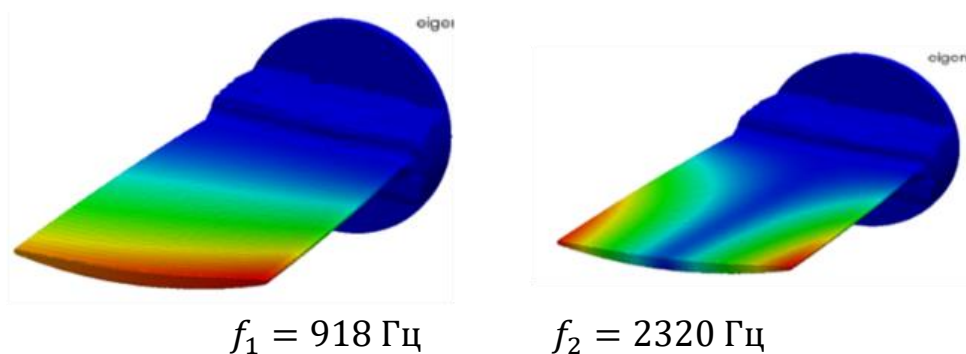


Рис. 6. Первые формы колебаний заготовки

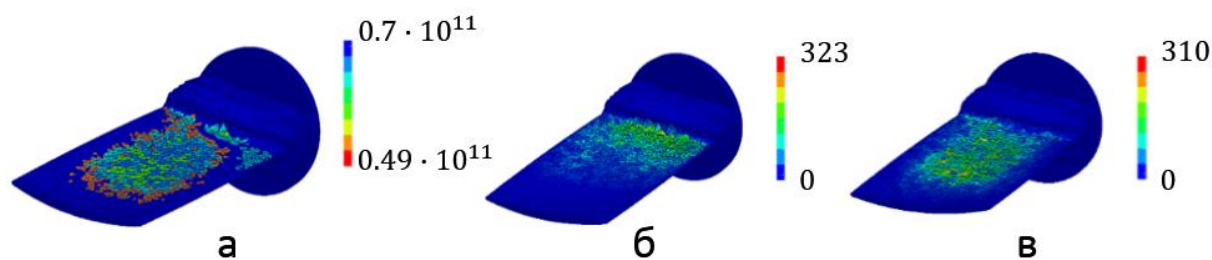


Рис. 7. Контурные карты значений параметров упругости после уточнения модели (а), коэффициентов чувствительности на первой собственной форме (б), и на второй собственной форме (в)

Разработанная программа позволила получить графики изменения собственных частот колебаний заготовки с учетом снятия материала в процессе чистовой обработки и корректировки параметров модели (Рис. 8).

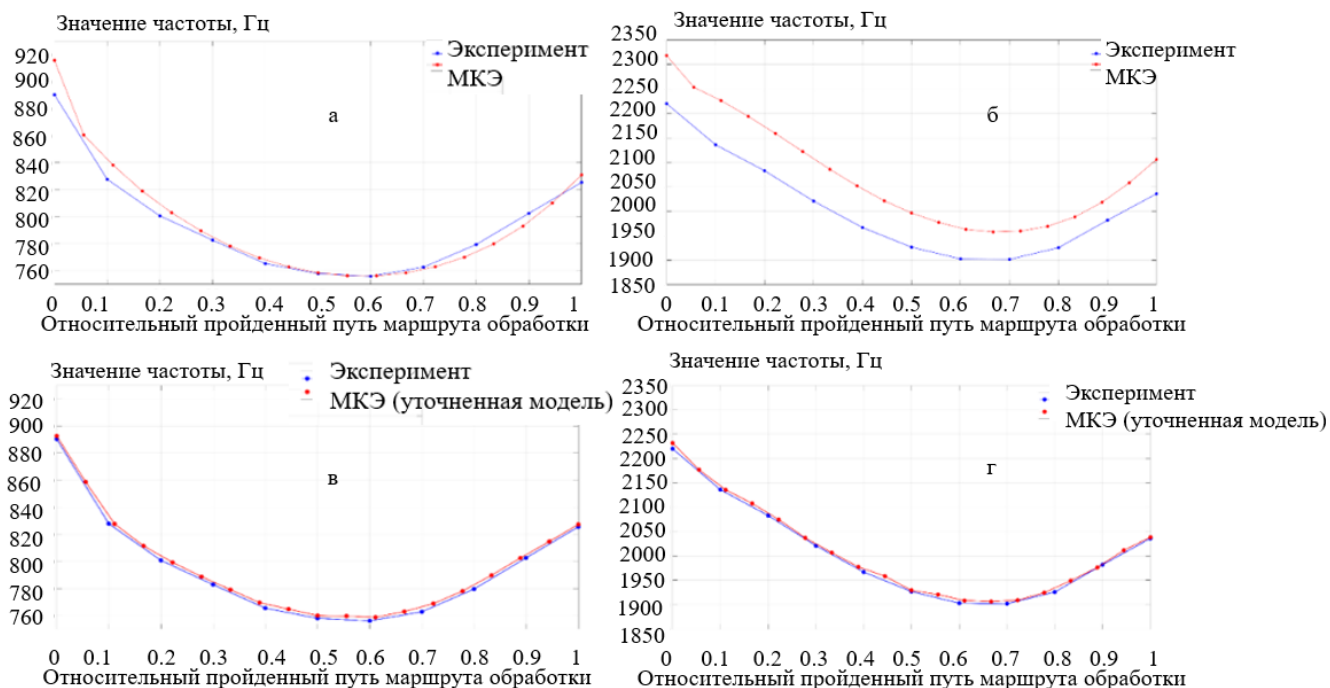


Рис. 8. Графики изменения первой (а) и второй (б) собственных частот колебаний в процессе чистовой обработки до уточнения модели и после уточнения модели (в, г)

В четвертой главе разработан подход к выбору виброустойчивых режимов при фрезеровании. Возникновение так называемого «чаттера», в процессе фрезерования приводят к значительному увеличению амплитуд вибраций инструмента/детали и сил резания. «Чаттер» происходит на частоте близкой к одной из собственных частот колебаний детали или инструмента. В основе предложенного подхода лежит метод обработки вибрационных сигналов процесса фрезерования с помощью сингулярного спектрального анализа (SSA), который, в сочетании с демодуляцией и фильтрацией, позволяет решать задачу детектирования «чаттера». Отношение амплитуды колебаний системы на частоте, не кратной частоте прохождения режущих кромок, к максимальной амплитуде колебаний на частоте, кратной частоте прохождения режущих кромок является индикатором возникновения «чаттера» в системе. Апробация разработанного метода проведено на временных реализациях, полученных по результатам численного многовариантного моделирования динамики фрезерования простой детали. В результате работы метода определена частота и амплитуда «чаттера», возникающего на различных режимах обработки.

В работе предложена новая интерпретация результатов многовариантного моделирования динамики процесса фрезерования – цветочастотная «карта режимов», которая позволяет выбирать параметры режимов обработки, при которых в системе гарантированно не будет

проявляться «чаттер», что позволит обеспечить требуемое качество поверхности детали, избежав появления вибрационных отметин.

Результаты апробации разработанного подхода показали его эффективность для решения задачи детектирования «чаттера» и выбора виброустойчивых режимов фрезерования сложнопрофильных маложестких деталей.

В пятой главе описано практическое применение предложенной методики идентификации на примере выбора виброустойчивых режимов обработки тестовой детали, а также проведено исследование влияния изменения коэффициентов демпфирования на динамику обработки.

Моделирование динамики обработки выполнено в специализированном ПО 3DCUT в соответствии с методикой, приведенной в главе 1 (Рис. 9). Обработка состоит из черновой, получистовой и чистовой стадии. Параметры обработки приведены в описании главы 2.

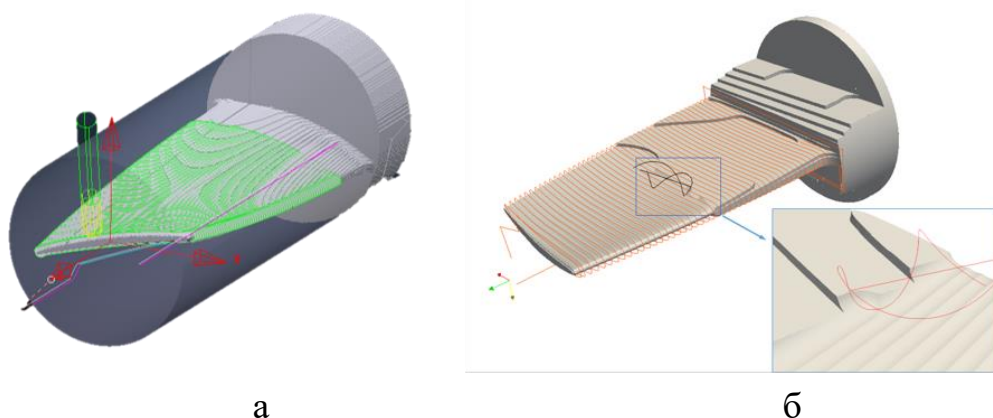


Рис. 9. Поверхность заготовки в процессе моделирования черновой обработки в САМ-системе (а) и в ПО 3DCUT (б)

В рамках исследования наибольший интерес представляет стадия чистовой обработки, так как именно на этой стадии влияние вибрационных отметин на качество поверхности является определяющим. Результатом моделирования процесса являются графики перемещений, сил резания и толщины срезаемого слоя, а также поверхность детали после обработки (Рис. 10).

Как видно из Рис. 10, при обработке с постоянной скоростью вращения инструмента поверхность детали после чистовой обработки испорчена вибрационными отметинами, которые являются следствием возникновения «чаттера» в процессе обработки. Для выбора виброустойчивых режимов обработки выполнено многовариантное моделирование динамики фрезерования исследуемой детали с различными скоростями вращения шпинделя.

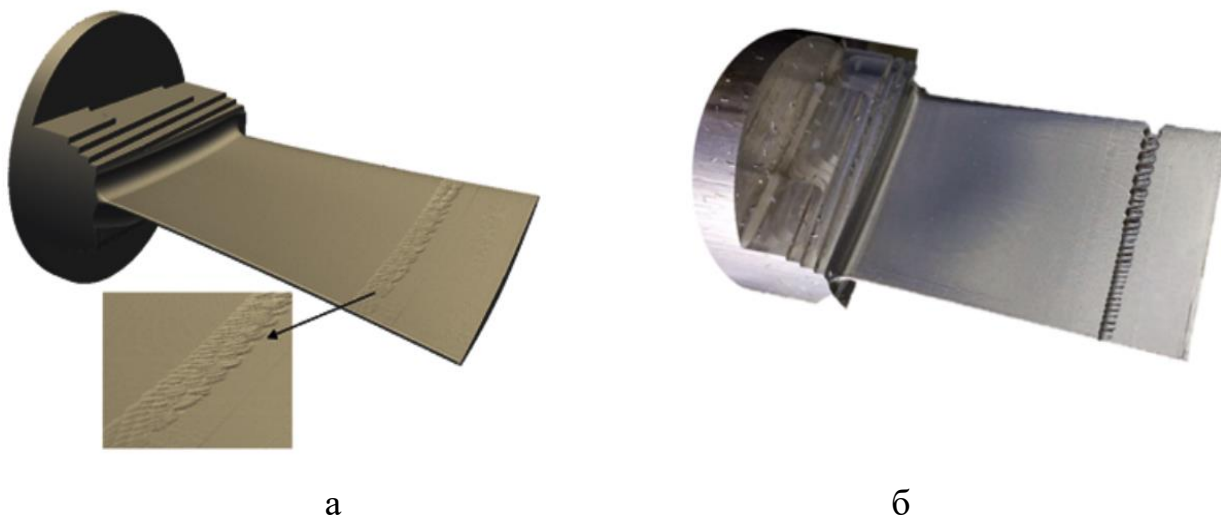


Рис. 10. Поверхность заготовки после чистовой обработки, полученная с помощью моделирования в ПО 3DCUT (а) и в результате фрезерования реальной заготовки (б) при постоянной скорости вращения инструмента

Для анализа динамики обработки с помощью подхода, основанного на применении метода детектировании «чаттера», изложенного в главе 4, построены цветографические карты режимов (Рис. 11). При построении карты режимов были использованы регрессионные зависимости коэффициентов демпфирования заготовки от точки маршрута, полученные в главе 2, а также уточненная конечно-элементная модель заготовки, полученная с помощью метода, описанного в главе 3. Синими точками на диаграмме отмечены благоприятные режимы, красными точками отмечены режимы, на которых имеет место «чаттер». Желтыми точками отмечены переходные режимы. Для двух точек диаграммы предоставлены соответствующие графики и спектры вибраций. Как видно из графиков при наличии «чаттера» амплитуда вибраций на порядок больше, чем при устойчивом процессе резания.

С помощью анализа данной диаграммы выбран рациональный режим обработки заготовки, свободный от проявления «чаттера» (показан зеленой линией) и получено высокое качество поверхности детали после обработки (Рис. 12).

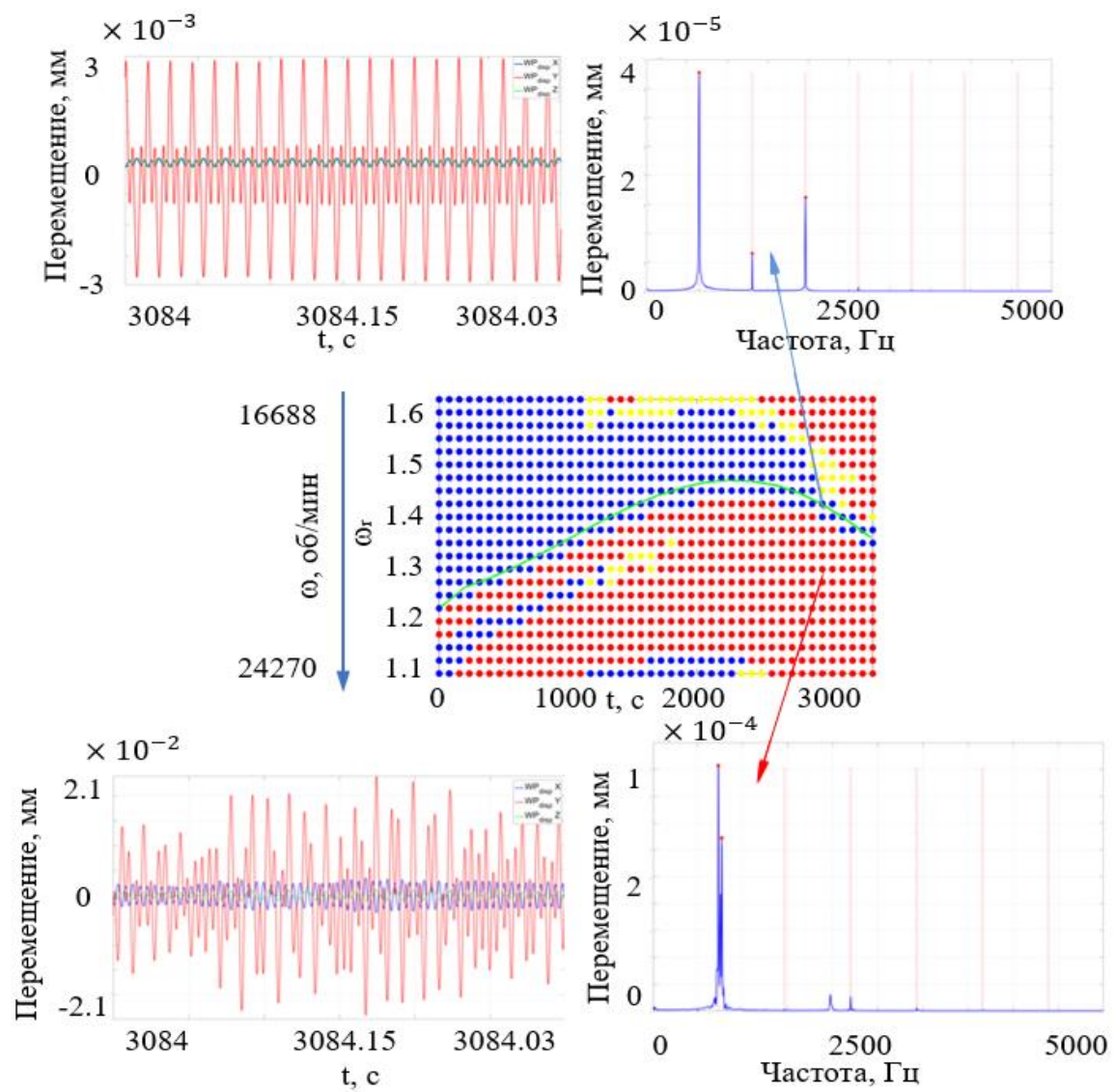


Рис. 11. Карта режимов обработки тестовой детали

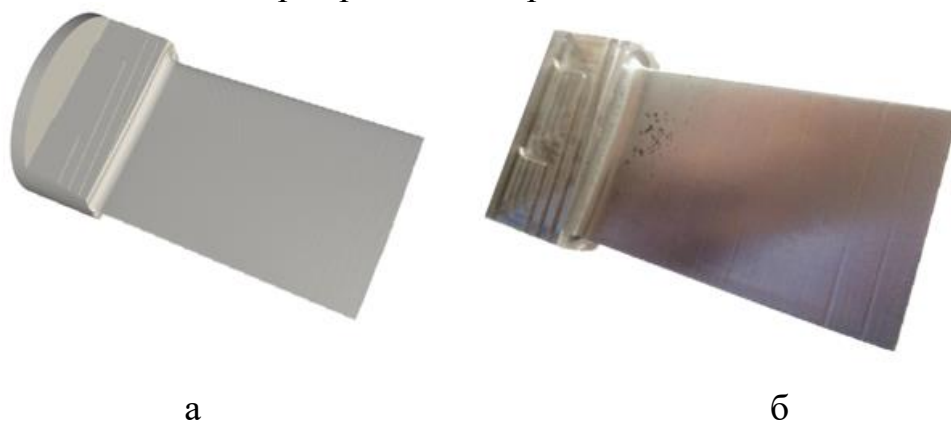


Рис. 12. Поверхность заготовки после чистовой обработки на оптимальном режиме, полученная с помощью моделирования (а) и в результате фрезерования реальной заготовки (б)

Основные результаты и выводы

1) Предложена методика проведения модальных испытаний для экспериментального определения собственных динамических характеристик заготовок тонкостенных деталей, изменяющихся в процессе обработки. Разработано соответствующее программное обеспечение для сбора и первичного анализа данных.

2) Разработана программа для идентификации динамических характеристик заготовки/инструмента по результатам модальных испытаний, а также метод и программа для автоматизированного уточнения конечно-элементной модели заготовки/инструмента на основе результатов экспериментального модального анализа. Разработанные программы могут быть использованы для идентификации динамических характеристик и уточнения конечно-элементных моделей любых конструкций, например, изделий аэрокосмической техники.

3) На основе методов цифровой обработки сигналов разработан метод анализа результатов имитационного моделирования процесса фрезерования и выбора виброустойчивых режимов обработки.

4) Результаты, полученные с помощью разработанных методов, позволяют сделать вывод о необходимости учета изменения коэффициентов демпфирования и собственных частот колебаний заготовки в процессе обработки для получения достоверных результатов моделирования динамики процесса фрезерования и выбора рациональных режимов обработки.

5) Применение разработанных методов идентификации динамических характеристик и уточнения конечно-элементной модели заготовки в комбинации с методикой численного моделирования динамики фрезерования позволяет эффективно решать задачу выбора рациональных режимов фрезерования тонкостенных сложнопрофильных деталей, с повышенными требованиями к качеству поверхности.

Публикации по теме диссертации Николаева С.М.

1. Карпачев А.Ю., Николаев С.М. Исследование динамических характеристик дисковой пилы с радиальными компенсаторами // Вестник машиностроения. 2013. № 12. С. 37 – 38. (0.125 п.л./0.06 п.л.)
2. Карпачев А.Ю., Николаев С.М. Динамические характеристики отрезных фрез // Вестник машиностроения. 2014. № 10. С. 80 – 82. (0.125 п.л./0.06 п.л.)
3. Методика уточнения конечно-элементной модели механической системы с помощью анализа чувствительности / С.М. Николаев [и др.] // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. DOI:

- 10.7463/1214.0751548. Рег. № ФС77-48211. (дата обращения 04.06.2017) (0.5 п.л./0.3 п.л.)
4. Николаев С.М., Жулёв В.А., Киселёв И.А. Уточнение конечно-элементной модели лопатки газотурбинного двигателя на основе результатов вибрационных испытаний с учётом разброса модальных параметров // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. DOI: 10.7463/0915.0802462. Рег. № ФС77-48211. (дата обращения 04.06.2017) (0.3 п.л./ 0.25 п.л.)
 5. Кузь В.А., Николаев С.М., Иванов И. И. Метод детектирования автоколебаний узлов технологической системы при фрезерной обработке. Часть №1: Описание и апробация алгоритма детектирования // Интернет журнал «Науковедение». 2016. URL. <http://naukovedenie.ru/PDF/132TVN616.pdf>. Рег. № ФС77- 39378. (дата обращения 04.06.2017) (0.9375 п.л./0.6 п.л.)
 6. Метод детектирования автоколебаний узлов технологической системы при фрезерной обработке. Часть 2: Экспериментальная апробация / С.М. Николаев [др.] // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. URL. <http://naukovedenie.ru/PDF/132TVN616.pdf>. Рег. № ФС77-39378. (дата обращения 04.06.2017) (0.75 п.л./0.5 п.л.)
 7. Иванов И.И., Воронов С.А., Николаев С.М. Моделирование вибраций при плоском фрезеровании с коррекцией частоты вращения в режиме реального времени // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. DOI: 10.7463/0317.0000947. Рег. № ФС77-48211. (дата обращения 04.06.2017) (0.85 п.л./0.35 п.л.)
 8. Nikolaev S., Kiselev I., Voronov S. Mechanical system finite element model refinement using experimental modal analysis // Proceedings of the 5-th International Operational Modal Analysis Conference. 2013. С. 167-173. (0.375 п.л./0.37 п.л.)
 9. Nikolaev S., Voronov S., Kiselev I. Estimation of damping model correctness using experimental modal analysis // Vibroengineering procedia. 2014. С. 126 – 132. (0.375 п.л./0.375 п.л.)
 10. Kuts V. A., Nikolaev S. M., Voronov S. A. The procedure for subspace identification optimal parameters selection in application to the turbine blade modal analysis // Procedia Engineering. 2017. №1 С. 367-368. (0.6875 п.л./0.45 п.л.)