

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу До Мань Тунга «Численный анализ влияния расстройки параметров на динамические характеристики рабочих колес турбомашин», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Актуальность темы

Расстройка лопаток по геометрии, материалу, массе и др. всегда возникает в реальных рабочих колесах турбомашин при их изготовлении или эксплуатации. Расстройка нарушает циклическую симметрию конструкции. При этом для изучения динамики рабочего колеса с расстройкой моделирование только одного сектора является недостаточным и нужно моделировать полное рабочее колесо. На сегодняшний день появилось несколько коммерческих промышленных программ, таких как ANSYS, NASTRAN и др. Но они не всегда позволяют определить динамический отклик при прерывистом, нестационарном действии газовых нагрузок, которые характерны для рабочих колес и их полные конечноэлементные модели часто состоят из миллионов степеней свободы.

Кроме этого, расстройка может привести к локализации уровня колебаний рабочих колес. Расстройка может привести к ограничению колебаний рабочего колеса до небольшой зоны. Также экспериментальные исследования для амплитуды и напряжений рабочих колес с расстройкой показали, что даже небольшая расстройка лопаток всегда увеличивает максимальную амплитуду колебаний при резонансе. Она может привести к возникновению резонансных напряжений, которые выше, чем максимальные напряжения настроенной системы на 20% и более.

Таким образом, анализ влияния расстройки лопаток на динамические характеристики рабочих колес турбомашин при их изготовлениях и эксплуатациях является актуальной проблемой.

Постановка цели и задач исследования

В диссертационной работе сформулирована её цель: разработка численных методов, эффективных алгоритмов и программного обеспечения, которая, во-первых, позволяет определять динамические характеристики рабочих колес с расстройкой; во-вторых, снижать трудоемкость и затраты времени на ЭВМ. Для достижения этой цели необходимо решение следующих задач:

- Построение основных алгоритмов метода конечных элементов (МКЭ) для расчета прочности пластинчато-оболочечных деталей турбомашин. Приведение видов и различных законов расстройки параметров рабочих колес турбомашин при их изготовлении или эксплуатации. Математическое моделирование и определение значений расстройки рабочих колес турбомашин МКЭ. Определение модели возбуждающих газодинамических сил, приближенных к реальным режимам работы двигателей турбомашин.

- Разработка и развитие численных методов и новых алгоритмов для расчета характеристик колебаний рабочих колес без учета и с учетом влияния вращения.
- Развитие эффективных методов и разработка методик и новых алгоритмов для математического моделирования рабочих колес турбомашин с расстройкой. Проведение оценки влияния расстройки параметров на характеристики колебаний рабочих колес и сравнение результатов расчета с данными эксперимента и результатами программного комплекса ANSYS. Выбор эффективных численных методов для оценки влияния расстройки параметров на динамические характеристики рабочих колес.
- Создание и развитие эффективных численных методов и алгоритмов и их реализация в виде программных комплексов для расчета влияния различных законов расстройки на характеристики колебаний реальных рабочих колес турбомашин.

Общая характеристика работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 180 наименований и приложения. Общий объем диссертации составляет 193 страницы, включая 100 рисунков, 22 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены объект и предмет исследования, цели исследования, задачи и методы их решения, приведены основные положения, выносимые на защиту, краткое содержание диссертации по главам.

В первой главе представлены проблема колебаний деталей турбомашин и влияние расстройки параметров и вращения на колебания рабочих колес турбомашин. Приведены основные результаты исследований эффекта расстройки параметров на динамические характеристики рабочих колес и методы моделирования рабочих колес с расстройкой, которые проводились в мире. В этой главе также выполнен обзор схем для оценки влияния расстройки на долговечность рабочих колес турбомашин и представлены расчетно-экспериментальные методы, такие как экспериментальной метод «Монте-Карло» для оценки влияния расстройки параметров на динамические характеристики рабочих колес турбомашин.

Во второй главе разработана модель возбуждающих газодинамических сил, приближённых к реальным режимам работы двигателей турбомашин, чтобы увеличить точность при анализе динамики деталей турбомашин. Также эта глава содержит описание сущности, вариантов применений МКЭ в технике, основных принципов МКЭ, основных алгоритмов при реализации МКЭ и виды конечных элементов для расчета прочности пластинчато-оболочечных деталей турбомашин.

Кроме этого, в этой главе приведены виды расстройки и различные законы расстройки параметров лопаток, которые часто возникают при изготовлении и эксплуатации рабочих колёс турбомашин. Однако соискатель представил основные алгоритмы МКЭ для определения значений расстройки лопаток рабочих колёс, и также разработал общие схемы программ для исследования влияния расстройки параметров на колебания рабочих колес турбомашин. Эти схемы является основой для выбора подхода к решению задач исследования колебаний рабочих колес с расстройкой на основе МКЭ.

В третьей главе представлены математическое моделирование и решение задачи исследования собственных колебаний кольцевых пластин с использованием кольцевых конечных элементов. Приведен метод циклической симметрии для исследования собственных колебаний циклически-симметрических систем, таких как рабочие колеса турбомашин без расстройки на основе одного типичного сектора с помощью МКЭ. Также представлено математическое моделирование ЦСС на основе пружинно-массовой модели (ПММ) в том, что приведен эффективный метод для определения эквивалентных физических величин системы (масса, жесткость, коэффициент демпфирования). Эти методы обеспечивают сходимость решения и снижают трудоемкость и численные затраты времени на ЭВМ.

Кроме этого, разработана и реализована программа PISVRBD для оценки влияния вращения на характеристики собственных колебаний рабочих колес турбомашин МКЭ.

В четвёртой главе приведены математическое моделирование и решение задач при исследовании характеристик колебаний рабочих колес турбомашин с расстройкой параметров на основе ПММ. Также представлен метод моделирования уменьшенного порядка (МУП) и экспериментальный метод для исследования колебаний рабочих колес турбомашин без расстройки и с расстройкой параметров лопаток. В методе МУП использован метод синтеза форм колебаний, который позволяет легко вносить расстройку лопаток в расчет, снизить размерность задачи до анализа только одного сектора и сократить существенно временные и материальные затраты в расчетах.

Кроме этого, создан программный комплекс PVROMBD для анализа влияния расстройки параметров на колебания рабочих колес турбомашин на основе МКЭ и МУП. Соискатель выполнил расчет вибрационных характеристик для модельного рабочего колеса с расстройкой и показал, что результаты расчета МУП хорошо согласуются с данными эксперимента и данными анализа в системе ANSYS. Также соискатель выявил поворотные зоны частот колебаний, в которых перемещения лопаток по Евклидовой норме для собственных вынужденных колебаний модельного рабочего колеса даже с маленькой расстройкой жесткости сильно изменяются.

В четвертой главе приведен метод для анализа влияния расстройки геометрии лопаток на характеристики собственных колебаний рабочих колес с использованием свойств циклической симметрии. Также выполнен расчет влияния расстройки толщины лопаток и диска на спектр собственных частот модельного рабочего колеса. Результаты расчета хорошо совпадают с результатами анализа в системе ANSYS.

В пятой главе проводятся анализ влияния различных законов расстройки жесткости лопаток на характеристики колебаний реального рабочего колеса турбомашин в поворотных зонах частот и установлено, что при введении расстройки в расчет двукратные частоты колебаний системы заметно расщепляются, расстройка нарушает гармоническое свойство перемещения лопаток по Евклидовой норме. В поворотных зонах частот колебаний амплитуды собственных колебаний рабочих колес даже с маленькой расстройкой жесткости сильно изменяются. В вынужденных колебаниях расстроенной системы возникает достаточно большие критические значения амплитуды перемещений лопаток и максимальные значения амплитуды перемещений лопаток рабочего колеса с

расстройкой выше, чем максимальные значения амплитуды перемещений лопаток рабочего колеса без расстройки (на 19,5%), что существенно снижает их долговечность. Эти результаты позволяют решать задачи чувствительности колебаний, оптимизацию и повышения прочности рабочих колес с расстройкой при проектировании новых и эксплуатации старых конструкций турбомашин.

Результаты работы

Основные результаты и выводы работы достаточно полно и всесторонне обоснованы. В целом работа производит хорошее впечатление, ее результаты можно трактовать как новое решение научно-технической задачи, имеющей существенное значение для развития численных методов и математического моделирования. Автор грамотно подошел к построению новых математических алгоритмов и численных методов, успешно реализовал соответствующие алгоритмы в виде комплексов программ для проведения численного эксперимента динамических характеристик рабочих колес турбомашин с расстройкой параметров на стадии их проектирования.

Работа прошла соответствующую апробацию, основные результаты отражены в 16 публикациях, среди которых 8 публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Соискатель получил диплом I степени в VII Всероссийской научно-практической конференции «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов» (Томск, 2014). Результаты, полученные в работе, использовались при выполнении НИР и в учебном процессе кафедры «Автоматизация производственных процессов» в Иркутском государственном университете путей сообщения, г. Иркутск, а также в учебном процессе кафедры «Информатика и математическое моделирование» Иркутской государственной сельскохозяйственной академии, г. Иркутск.

Научные положения, выводы и результаты диссертационной работы корректны и научно обоснованы.

Диссертация соответствует специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (п. 4, 5, 6).

Научная новизна, практическая ценность и достоверность результатов

Новизна полученных результатов и их научная ценность заключается в предложении математического моделирования рабочих колес турбомашин с расстройкой, разработке и развитии численных методов, эффективных алгоритмов и программного обеспечения для оценки влияния расстройки параметров лопаток на характеристики колебаний рабочих колес турбомашин. Кроме этого, соискатель систематизировал виды и варианты расстройки параметров рабочих колес турбомашин при их изготовлении, сборке и эксплуатации, также выполнил комплексные исследования для оценки влияния различных законов расстройки параметров на свободные и вынужденные колебания реальных рабочих колес турбомашин с применением математического моделирования и вычислительного эксперимента и выявил зоны частот, в которых формы собственных и

вынужденных колебаний рабочих колес даже с небольшой расстройкой жесткости лопаток сильно изменяются как качественно, так и количественно.

Практическая значимость предложенных алгоритмов состоит в создании математического и программного обеспечения для исследования характеристик колебаний рабочих колес турбомашин без расстройки и с расстройкой параметров при существенном повышении точности и снижении временных и материальных затрат на ЭВМ. Это математическое и программное обеспечение могут применяться на стадиях проектирования, сборки и эксплуатации для большинства циклически симметричных конструкций на предприятиях авиационного, космического, транспортного, энергетического, химического и нефтяного машиностроения.

Построенные в работе модели основываются на корректном применении теории упругости, теории колебаний, теории механики деформируемого твердого тела и др. Все утверждения подтверждены ссылками на источники. Результаты соответствуют результатам экспериментальных исследований, данным других авторов и данным расчетов в программных комплексах ANSYS, BLADIS+. Это дает основание считать полученные результаты достаточно обоснованными и достоверными.

Замечания по диссертационной работе

К недостаткам работы можно отнести следующие:

1. В диссертации не представлены преимущества развитого автором метода моделирования уменьшенного порядка (МУП) по сравнению с анализом полной модели (ПМ). Представлены лишь доказательства его точности, но нет сравнения с традиционными методами по требуемым компьютерным ресурсам (времени счета, памяти ЭВМ и т.п.).
2. Не четко указано, почему использована Евклидова норма для оценки влияния расстройки на формы колебаний рабочего колеса турбомашин.
3. Метод циклической симметрии, а также учет влияния вращения на собственные частоты уже давно известны и протестираны (например, в [41] и [51] из списка литературы диссертации). Если ли смысл повторно так подробно их описывать и тестировать в диссертации?
4. Автором не проведены лично натурные эксперименты для подтверждения расчетных данных, на которые имеется ссылка в работе при анализе достоверности программного комплекса.
5. В диссертации имеются опечатки (например, стр. 149).

В качестве пожелания, автору предлагается продолжить исследования по влиянию расстройки параметров на усталостную прочность рабочих колес.

Общее заключение

Высказанные выше замечания не снижают высокого уровня проведенной соискателем работы, из чего следует, что диссертационная работа До Мань Тунга «Численный анализ влияния расстройки параметров на динамические характеристики

рабочих колес турбомашин» является завершенной научно-квалификационной работой. Полученные автором результаты являются достаточно новыми, обоснованными и достоверными. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Работа отвечает требованиям Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор, До Мань Тунг, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
Машиностроительных технологий и
материалов ФГБОУ ВПО «Иркутский
государственный технический университет»

 С.А. Зайдес

(664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83;

тел.: 8(3952)405-147, email: zsa@istu.edu)

