

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»

Работа деталей (рабочих колес) турбомашин сопровождается их колебанием. Колебания, как правило, вызывают высокое напряжение для вращающихся деталей, и снижает их усталостную прочность при эксплуатации. При изучении динамики роторов турбомашин принимают, что идеальные рабочие колеса являются циклически-симметричными системами. Вместе с тем реальных рабочих колесах всегда возникают отличия от идеальных условий связанных с отклонениями от геометрической формы, точности размеров при изготовлении и износа их элементов (лопаток) при эксплуатации. Данные отличия называемые расстройкой нарушают циклическую симметрию конструкции. Расстройка приводит к локализации уровня колебаний рабочих колес. Также она может привести к ограничению колебаний рабочего колеса до небольшой зоны. Экспериментальными исследованиями доказано, даже небольшая расстройка в рабочих колесах приводит к изменению их максимальной амплитуды колебаний при резонансе. Она может привести к возникновению резонансных напряжений, которые выше, чем максимальные напряжения настроенной системы на 20% и более.

Известно, что рабочие колеса турбомашин без расстройки обладающие свойством циклической симметрии, позволяют анализировать их динамические характеристики на основе базового сектора, но для рабочих колес с расстройкой необходима их полная модель. Моделирование полной модели рабочих колес вызывает существенное повышение объема входных данных и размерности задачи при расчете. Работа направленная на разработку высокоэффективных методов и средств прогнозирования и оценки влияния расстройки рабочих колес на усталостную прочность при их проектировании и эксплуатации является актуальной задачей.

Актуальность диссертационной работы заключается в разработке и развитии математических моделей, численных методов и программ расчета, которые позволяют определить влияния расстройки на динамические характеристики рабочих колес турбомашин, снижение трудоемкости их оценки.

Целью диссертационной работы является разработка численных методов, эффективных алгоритмов и программного обеспечения для оценки влияния расстройки лопаток на динамические характеристики рабочих колес турбомашин на основе метода конечных элементов (МКЭ) и норм для оценки динамических характеристик деталей.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- Построение основных алгоритмов МКЭ для расчета прочности пластинчато-оболочечных деталей турбомашин. Анализ видов и различных законов расстройки параметров рабочих колес турбомашин при их изготовлении или эксплуатации. Математическое моделирование и определение значений расстройки рабочих колёс 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.

- 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.

2. 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.

По результатам работы сформулированы следующие научных положения:

1. Систематизированы виды и варианты расстройки параметров рабочих колес турбомашин при их изготовлении, сборке и эксплуатации. Разработаны и развиты эффективные алгоритмы МКЭ для определения значений расстройки рабочих колес.

2. Развита метод математического моделирования рабочих колес турбомашин для расчета их динамических характеристик на основе пружинно-массовой модели (ПММ). Разработан эффективный численный метод для определения эквивалентных физических величин механической системы, таких как масса, жесткость, коэффициент демпфирования и др.

3. Предложено математическое моделирование и развиты численные методы для анализа вибрационных характеристик рабочих колес турбомашин с расстройкой параметров на основе метода моделирования уменьшенного порядка (МУП) и МКЭ. Разработан алгоритм и создано программное обеспечение для оценки влияния расстройки лопаток на характеристики колебаний рабочих колес турбомашин.

4. Выполнены 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. Выявлены зоны частот, в которых формы собственных и вынужденных колебаний рабочих колес даже с небольшой расстройкой жесткости лопаток сильно изменяются как качественно, так и количественно.

Согласно *первому положению* приведены виды расстройки и различные законы расстройки параметров лопаток, которые часто возникают при изготовлении и эксплуатации рабочих колёс турбомашин. Однако соискатель разработал алгоритмы и программы, основанные на МКЭ, позволяющие определить значения расстройки рабочих колес и увеличить точность при оценке влияния расстройки параметров на динамические характеристики рабочих колес турбомашин (разд. 2.6).

В соответствии с *вторым и третьим положениями* предложено математическое моделирование рабочих колес без расстройки и с расстройкой, также разработаны и развиты численные методы для анализа динамических характеристик конструкции, такие, как метод циклической симметрии для анализа собственных колебаний циклически симметричных систем (разд. 3.2); метод исследования динамических характеристик рабочих колес с учетом вращения (разд. 3.4 и 3.5); метод исследования влияния расстройки на характеристики собственных колебаний рабочих колес с использованием свойств циклической симметрии (разд. 4.4); метод моделирования ЦСС на основе пружина-массовой модели (разд. 3.3 и 4.1) и метод МУП для оценки влияния расстройки на динамические характеристики рабочих колес турбомашин (4.2). Использование этих методов обеспечивает сходимость решения, дает результаты с высокой точностью и снижает трудоемкость и затраты времени на ЭВМ.

Кроме этого, соискатель разработал алгоритмы и создал программный комплекс PVROMBD на основе МУП и МКЭ, позволяющий определять характеристики колебаний рабочих колес турбомашин при снижении размерности задачи до анализа только одного сектора и существенном сокращении временных и материальных затрат в расчетах.

Основным научным достижением работы являются комплексные исследования, предложенные в *четвёртом положении*, для оценки влияния различных законов расстройки параметров на характеристики колебаний реальных рабочих колес турбомашин. Соискатель разработал модель возбуждающих газодинамических сил, приближённых к реальным режимам работы двигателей турбомашин, чтобы увеличить точность при анализе динамики деталей турбомашин (разд. 2.2). Также соискатель выполнил численный анализ колебаний реального рабочего колеса турбомашин с расстройкой жесткости одной лопатки и расстройкой жесткости всех лопаток, значения которых изменяются по закону нормального распределения Гаусса. Результаты расчета показывают, что расстройка лопаток оказывает значительное влияние на характеристики колебаний и

долговечность рабочих колес турбомашин. На графике частот собственных колебаний рабочих колес в зависимости от числа узловых диаметров и окружностей часто появляются поворотные зоны частот. В этих зонах собственные колебания рабочих колес с небольшой расстройкой ограничивается до маленькой зоны (колеблется только несколько лопаток). Для случая вынужденных колебаний возникает большое количество критических значений амплитуды перемещений лопаток и максимальные значения амплитуд перемещений лопаток расстроенной системы часто выше, чем настроенной системы (до 22%), что существенно снижает их долговечность.

3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов, рекомендаций и заключений

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов, рекомендаций и заключений, полученных в диссертации, подтверждаются корректным использованием 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+. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Это дает основание считать полученные результаты достаточно обоснованными и достоверными.

4. Значимость результатов, полученных в диссертации, для науки и практики

Научная значимость результатов заключается в математическом моделировании рабочих колес турбомашин с расстройкой, разработке и развитии численных методов, эффективных алгоритмов и программного обеспечения для анализа влияния расстройки параметров лопаток на характеристики колебаний рабочих колес турбомашин. При этом свойство циклической симметрии, пружинно-массовая модель, метод МУП на основе метода синтеза форм колебаний используются для повышения точности результатов расчета и снижения трудоемкости и затрат времени на ЭВМ.

Практическая значимость заключается в создании математического и программного обеспечения для исследования характеристик колебаний рабочих колес турбомашин без расстройки и с расстройкой параметров, которые могут применяться на стадиях проектирования, сборки и эксплуатации для большинства циклически симметричных конструкций на предприятиях авиационного, космического, транспортного, энергетического, химического и нефтяного машиностроения. Однако соискатель выявил поворотные зоны частот, в которых характеристики колебаний рабочих колес даже с небольшой расстройкой жесткости лопаток сильно изменяются как качественно, так и количественно.

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.

5. Замечания по диссертационной работе

К недостаткам работы можно отнести следующие:

- В второй и четвертой главе описаны алгоритм и создано программное обеспечение для оценки влияния расстройки лопаток на характеристики колебаний рабочих колес турбомашин, которые состоят их двух этапов: определение значений расстройки лопатки и анализ влияния расстройки лопаток на характеристики колебаний рабочих колес, но автор не указал, как вносятся значения расстройки лопаток (этап 1) в расчет при анализе влияния расстройки лопаток на характеристики колебаний рабочих колес (этап 2);

- В разделе 4.3 не достаточно полно разработана модель расстройки лопаток по массе, при использовании созданного программного комплекса PVROMBD для исследования характеристики колебаний рабочих колес турбомашин с расстройкой;

- При анализе достоверности расчетов программного комплекса, использованы результаты натуральных испытаний выполненных не автором данной диссертационной работы.

- В работе обнаружено несколько опечаток, есть также замечания по оформлению рисунков.

Отмеченные недостатки не снижают научную и практическую ценность работы в целом.

6. Общее заключение

Диссертационное исследование До Мань Тунга имеет теоретический и практический интерес, выполнено на достаточно высоком научном уровне в рамках паспорта специальности 05.13.18 - - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Результатом работы является новое решение научно-технической задачи, имеющей существенное значение для развития численных методов и математического моделирования конструкций. Автор успешно подошел к разработке новых математических алгоритмов и развитию численных методов, реализовал соответствующие алгоритмы в виде программного комплекса для проведения численного эксперимента динамических характеристик рабочих колес турбомашин с расстройкой параметров на стадии их проектирования. Приведенные результаты можно классифицировать как новые, обоснованные и имеющие практическое и научное значение.

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 16 работах, из которых 8 публикаций в научных журналах из списка, рекомендованного 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).

Публикации автора и автореферат полно и всесторонне отражают содержание диссертационного исследования.

Работа представляет собой завершённое исследование и отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, а её 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,
кандидат технических наук, доцент,
декан Машиностроительного
факультета ФГБОУ ВПО «Восточно-
Сибирский государственный
университет технологий и управления»

 А.Д. Грешилов

Почтовый адрес: 670013, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул.
Ключевская, д. 40в.

Телефон: 8(3012)41-05-35 раб. 89085911155 сот.,
email: agreshilov@mail.ru

Удостоверяю

