

## **ОТЗЫВ**

### **официального оппонента**

на диссертационную работу Шатохина Виктора Федоровича на тему  
«Колебания роторов турбоагрегатов с обкатом ротором статора при задеваниях  
(методы математического моделирования и программные средства)»,  
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по  
специальности 05.04.12 – «Турбомашины и комбинированные турбоустановки»

Диссертационная работа выполнена в ОАО «Калужский турбинный завод». Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, двух приложений и списка литературных источников, насчитывающего 188 наименований. Весь материал изложен на 283 страницах и содержит 95 рисунков, 8 таблиц, два приложения.

#### **Актуальность темы.**

Способность агрегатов противостоять особым (специфическим) динамическим воздействиям, связанным, прежде всего, с нештатными условиями, возникающими в процессе их эксплуатации, привлекает все большее внимание проектантов. Такие нестационарные воздействия на турбомушину, как внезапная разбалансировка при разрушении рабочих лопаток, сейсмическое или взрывное воздействие, короткое замыкание и др. могут вызывать очень опасное развитие механизмов взаимодействия вращающегося с большой скоростью массивного ротора и не менее массивного статора. Задевания и обкат ротором статора могут привести к серьезным повреждениям или даже к разрушению турбоагрегата. Но для обеспечения надежности агрегата при его проектировании или его своевременной защиты в эксплуатации необходимо глубокое изучение указанных явлений, их математическое моделирование, численные исследования и сопоставление их результатов с существующими экспериментальными данными.

**Именно исследованиям динамики роторных систем при особых динамических воздействиях и защите турбоагрегатов при таких воздействиях посвящена представленная диссертация, что и определяет актуальность ее тематики и своевременность выполнения.**

Введение содержит краткое обоснование актуальности работы, описание цели, задач, научной новизны и практической ценности работы.

В первой главе описывается состояние вопроса по тематике диссертации. Дается достаточно полный обзор существующих работ (как отечественных, так и зарубежных) в области стационарной и нестационарной динамики роторных систем с оценкой их результатов и значимости. В данной главе диссертант демонстрирует опасность возникновения обката в результате нестационарных колебаний, хорошую осведомленность относительно вибрационных характеристик современных турбоагрегатов и проблем, возникающих при их вибрационной наладке.

**Представленный обзор имеет самостоятельный интерес для специалистов в данной области.**

Исходя из проведенного анализа литературных данных и в соответствии с поставленной целью диссертационной работы, сформулированы основные задачи исследования. Решение каждой из задач стационарной и нестационарной динамики ротора сопровождается изложением физической и математической моделей исследования стационарных и нестационарных колебаний, информацией о структуре программного модуля для решения задачи.

На основе математических моделей разработаны алгоритмы задач динамики ротора и программные модули, составляющие комплекс программных средств, позволяющий решать задачи проектирования, доводки и модернизации роторных систем ТА различного назначения.

Вторая и третья главы посвящены рассмотрению математической модели переходных колебаний ротора без контакта и с контактом со статором.

Используя в основе известную математическую модель переходных колебаний при внезапной разбалансировке симметричного ротора на двух анизотропных опорах без контакта, диссертант **значительно расширяет область исследований такой модели, представив новые результаты численных исследований по траектории бесконтактного движения жесткого и гибкого роторов с учетом демпфирования.**

Разработанные алгоритмы и программные модули исследования движения ротора без задеваний позволяют ответить на вопрос о допустимой величине разбалансировки и о влиянии демпфирования на характер траектории движения ротора при разных значениях  $\alpha = \omega / p$ . На примерах переходных колебаний гибкого ротора показано изменение направления прецессии ротора от прямой к обратной при колебаниях, если угловая скорость разбалансировки  $\omega$  лежит между двумя собственными частотами гибкого ротора.

Автором показано, что в результате контакта ротора со статором возникают позиционные силы, которые не только препятствуют смещению ротора в горизонтальном и вертикальном направлениях. Исследованы переходные колебания после внезапной разбалансировки с учетом задеваний о жесткий и податливый статор. "Жёсткие" задевания характеризуются значительными амплитудами вибрации, "Мягкие" задевания приводят к незначительным отклонениям по виброскорости, но их опасность заключается в возможности возбуждения низкочастотной вибрации (НЧВ) ротора с большой амплитудой, Связано это с тем, что побочные коэффициенты жесткости этих сил обуславливают появление неконсервативной составляющей и природа ее в появлении трения при контакте ротора и статора. И как результат действия этих сил возникают и развиваются автоколебания, совпадающие по частоте с ближайшей собственной частотой системы.

Полученная математическая модель была применена автором к анализу аварии турбоагрегата 300 МВт на Каширской ГРЭС в 2002 г.

**Расчёты по разработанному алгоритму подтвердили гигантские силы взаимодействия ротора со статором в процессе развития обката и позволяют объяснить причины катастрофической аварии.**

Главы 4-7 посвящены апробации разработанных моделей применительно к реальным случаям. На основе моделей, рассмотренной в предыдущих главах, сформулированы и исследованы более близкие к реальным условиям нестационарные колебания валопровода на нескольких опорах и с задеванием о статор в одном или нескольких сечениях. При этом диссертант попытался учесть в разрабатываемых моделях всю многосложность явлений (и влияние свойств гидродинамических подшипников, и аэродинамических сил и задеваний ротора о статор). И, следует сказать, что поставленную задачу исследования кинематически сложных объектов с учетом разнообразия исследуемых конструкций диссертанту в целом удалось успешно решить.

Возможно, что для оценки количественного совпадения результатов расчетов и реальных динамических процессов потребуются еще многократные сравнения, но с точки зрения качественной оценки влияния различных факторов на роторную динамику и надежность разрабатываемых агрегатов, а также на методы их защиты, автором внесен неоценимый вклад в теорию и практику исследований и проектирования. В части представления нелинейных колебаний с задеваниями о податливый статор разработанные методы и полученные результаты не имеют аналогов.

В заключении обобщены результаты исследований, выполненных в рамках диссертационной работы.

**Научная новизна** рецензируемой работы состоит в том, что:

- впервые разработана математическая модель, алгоритм и программные модули математического моделирования нелинейных нестационарных колебаний после внезапной разбалансировки симметричного ротора на анизотропных опорах при задеваниях о *податливый* статор. Динамическая

характеристика податливого статора предполагается существенно нелинейной с возможностью учёта потерь энергии при деформировании статора (или перемещении статора, например, в пределах деформаций упруго-демпферных связей амортизирующего крепления статора).

- впервые представлено решение задачи нестационарных колебаний при нелинейных характеристиках опор, когда возможность контакта рассматривается не только в пролёте (между опорами), но, одновременно, в одной или нескольких опорах с потерями энергии в опорах и в статоре. Оригинальность алгоритма и результаты моделирования колебаний многоопорных роторов с задеваниями о *податливый* статор, исследования развития обката ротором статора не имеют аналогов в России и за рубежом.

- впервые рассмотрена физическая модель, метод математического моделирования, алгоритм и программный модуль для определения с учётом динамических свойств статора-фундамента ТА реакции многоопорного ротора на импульсное внешнее (кинематическое) воздействие в виде ударной волны контактного или неконтактного взрыва, возбуждающей основание ТА (сотрясение основания), позволяющие оценить сохранение работоспособности конструкции ТА. Рассмотрено влияние потерь в опорах и статоре при их деформации (перемещении) на возможность стабилизации развивающегося асинхронного обката и сведения его к менее опасной установившейся форме обката с прямой прецессией ротора, а также рассмотрены влияния быстрогодействия систем защиты ТА на погашение развивающегося обката.

**Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждается:**

- использованием фундаментальных математических и физических моделей для решения поставленных задач динамики ротора;
- верификацией алгоритмов с помощью системы тестов;

- сравнением результатов математического моделирования колебаний с экспериментальными результатами и результатами отечественных и зарубежных авторов;

- логической непротиворечивостью результатов реально наблюдавшимся процессам развития аварийных ситуаций и описаниям экспертами конечных последствий аварий.

**Практическая ценность работы** заключается в том, что ее результаты доведены до их практического использования в проектировании ТА энергетического и транспортного машиностроения. Математические модели и комплекс программных средств моделирования нелинейных колебаний ротора при различных сценариях рабочего состояния ТА в условиях задеваний ротором статора не имеет аналогов в настоящее время.

**Личный вклад автора** не вызывает сомнений. Диссертант известный в энергомашиностроении специалист, обладающий поистине энциклопедическими знаниями и вклад которого в решение проблем роторной динамики широко известен и высоко оценен коллегами.

Все основные положения и результаты, полученные в диссертации, опубликованы в соответствующих изданиях и в полной мере апробированы на ведущих международных, всероссийских и отраслевых конференциях и совещаниях.

#### **Замечания и рекомендации по работе.**

1. Несмотря на то, что автором рассматриваются, в первую очередь переходные режимы, возникающие при возникновении задеваний ротора со статором, и развитие процесса обката, автору не следовало бы напрямую отождествлять понятия «синхронного» и «асинхронного» обката с совпадением или несовпадением направления прецессионного движения ротора и направлением собственного вращения ротора., т.е. с понятием прямой и обратной прецессии (стр.3 автореферата, стр. 10 диссертации).

2. Есть отдельные замечания по терминологии, когда общепринятые и общепризнанные профессиональные термины заменяются жаргонной производственной лексикой, что является обычным следствием многолетней производственной деятельности.

3. При наличии глубоких и разнообразных математических описаний моделей хотелось бы более четких рекомендаций по оценке применения различных конструктивных решений, позволяющих уменьшить склонность к режимам обкатки с чрезвычайными нагрузками на подшипники или другие статорные узлы турбоагрегата.

4. Было бы очень правильным продолжить в дальнейшем исследования случаев «мягких» задеваний утоненными вершинами лопаток, усами радиальных уплотнений стандартных и, особенно, сотовых уплотнений. Вполне возможно, что участвовавшие случаи возникновения низкочастотной вибрации при пуске из ремонтов турбоагрегатов с критическими параметрами пара, в которых использованы сотовые уплотнения, могут быть объяснены именно такими «мягкими» задеваниями.

**Сделанные замечания не снижают научной и практической ценности выполненной работы, но указывают на перспективность ее продолжения.**

Содержание автореферата полностью соответствует диссертации. Основные результаты работы изложены в 42 публикациях, свыше 30 из которых в реферируемых изданиях, в т. ч. 15 в изданиях из списка ВАК.

Представленная работа обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты. В диссертации даны рекомендации по использованию научных теоретических выводов автора и приводятся сведения о практическом использовании полученных автором научных результатов.

Диссертация Шатохина В.Ф. на соискание ученой степени доктора технических наук является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны

теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение. Вместе с тем, в диссертации изложены и новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в создание надежных энергетических и транспортных турбоустановок, в т.ч. и агрегатов особого назначения, что является важнейшим вкладом в развитие энергомашиностроительной отрасли страны.

Считаю, что диссертационная работа Шатохина Виктора Федоровича отвечает всем требованиям и критериям п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» в редакции Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.04.12 «Турбомашины и комбинированные турбоустановки».

Официальный оппонент,  
доктор технических наук (специальность 05.04.12 –Турбомашины  
и комбинированные турбоустановки), профессор,  
Лауреат премии Правительства России в области науки и техники,  
профессор кафедры «Турбины и двигатели» Уральского  
федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.  
620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19  
Тел.: 8 (343) 375-41-01 , 8 (343) 375-48-51, E-mail: [evuriev@gmail.com](mailto:evuriev@gmail.com)

21. 11. 19

/Урьев Евгений Вениаминович/

