

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Шатохина В.Ф. «Колебания роторов турбоагрегатов с обкатом ротором статора при задеваниях (методы математического моделирования и программные средства)» представленную к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные установки в диссертационном Совете Д 222.001. 01 при Открытом акционерном обществе «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт» РАН

Диссертация В.Ф. Шатохина посвящена проблеме повышения вибрационной надежности турбоагрегатов (ТА) при различных условиях эксплуатации, в том числе, и во внештатных аварийных ситуациях, как например, внезапная разбалансировка, короткое замыкание, сейсмическое воздействие. Исследуется один из наиболее опасных возникающих при этом режимов - обкат ротором статора с обратной прецессией. Этот режим сопровождается сильным истиранием контактирующих поверхностей, огромными силами нормального давления, действующими на статор, что нередко приводит к разрушению ТА. Поэтому тема представленной диссертации является весьма *актуальной*.

Диссертация содержит 283 стр. текста: введение, 7 глав, список литературы и два приложения.

Во Введении приводится обоснование актуальности представленной работы, сформулированы цели и задачи исследования.

В первой главе дается анализ современного состояния проблемы стационарных и нестационарных колебаний роторных систем в режиме обката при прямой и обратной прецессии. Отмечена сложность этой проблемы и многообразие режимов при контактном взаимодействии (виброударные режимы, скачкообразное изменение жесткости системы и т.п.). Приводятся примеры аварий на теплоэлектростанциях с тяжелыми катастрофическими последствиями и разрушениями валопроводов.

Во второй главе диссертации исследуются переходные режимы ротора на анизотропных опорах без контакта со статором при внезапной разбалансировке. Подтверждено возникновение обратной прецессии неуравновешенного ротора внутри частотного диапазона, определяющего асимметрию системы. Приводится описание программы расчета для данной задачи. Эту главу можно рассматривать как верификацию программного модуля.

В третьей главе приводится физическая и математическая модель движения двухопорного ротора при контактах с жестким или податливым статором в случае внезапной разбалансировки. На основе разработанного автором пакета программ анализируется сценарий развития обката, который начинается с прямой прецессии, а затем после нескольких контактов со статором переходит в обратную прецессию («асинхронный обкат» в терминологии автора) с возрастанием скорости прецессии до предельных значений в течение долей секунды. Статор представлен в виде безынерционного кольца, имеющего нелинейную жесткость, описываемую петлей гистерезиса. Обратная прецессия рассматривается как автоколебательный режим, обусловленный контактными позиционными силами сухого трения. Следует отметить, что обкат жесткого статора, как самовозбуждающиеся колебания при действии сил сухого трения рассматривал Ден-Гартог.

Исследуются особенности развития обката при различных условиях работы ротора: 1) при постоянной угловой скорости, когда генератор не отключен от сети, 2) при отключении генератора, 3) с учетом времени срабатывания системы защиты.

Найдены допустимые параметры системы (уровень внезапной разбалансировки (0.02-0.12% массы ротора), быстродействие системы защиты, величина демпфирования), позволяющие предотвратить режим обката. Показано, что при более податливом статоре за счет поглощения энергии уменьшается опасность возникновения обката. Определяющим фактором также является коэффициент трения при контакте со статором.

Получены характеристики движения ротора: траектории, скорость прецессии, силы давления ротора на статор. Их расчет связан с необходимостью попеременного формирования начальных условий в моменты входа и выхода ротора из контакта, и последующего интегрирования уравнений движения в зависимости от параметров системы и режима работы двигателя.

На основе разработанного автором подхода смоделирована авария на Каширской ГРЭС 2002 г. как разрушение корпуса цилиндра среднего давления вследствие обката отделившегося фрагмента ротора и повреждения фланцевого соединения цилиндра. Силы давления на статор при этом, как показали расчеты, превышали вес ротора в 10^5 раз, а предельные параметры обката достигались за 0.02 сек.!

Эта глава диссертации является, пожалуй, определяющей в смысле формирования дальнейшей идеологии исследования более общих моделей контактного движения ротора.

В четвертой главе рассматриваются нестационарные колебания многоопорного ротора при его контактах со статором и с опорами в одном или нескольких сечениях. Наиболее опасной представляется разбалансировка в местах пучности прогибов ротора. Построена достаточно общая конечно-элементная балочная модель неуравновешенного ротора с учетом упруго-демпферных характеристик статора, масляного слоя подшипников, аэродинамического потока в уплотнениях. Следует отметить новизну разработанных диссертантом математических моделей и программных комплексов, позволяющих исследовать практически важные задачи, в том числе и развитие обката в случае:

- одновременного контакта ротора со статором в нескольких местах по длине ротора,
- разбалансировки ротора в одном из пролетов.

Представляет интерес сравнение воздействия неконсервативных сил вызывающих автоколебания с прямой прецессией (венцовые силы в уплотнениях и гидродинамические силы в масляной пленке) и сил сухого трения, вызывающих обкат с обратной прецессией. Показано, что влияние последних на работу роторной системы оказывается преобладающим, иногда на несколько порядков.

Проведены расчеты трех- и четырех опорного ротора с жестким и податливым статором с одновременным учетом всех неконсервативных циркуляционных сил при задевании ротором подшипников и корпуса в нескольких местах по длине ротора.

В пятой главе исследуются нестационарные колебания многоопорного ротора при импульсном кинематическом воздействии со стороны основания. Опоры схематизируются двухмассовыми моделями, упруго - демпферные характеристики которых зависят от скорости вращения ротора. Рассматривается математическая модель «ротор - опоры», что дает возможность учесть изменение характеристик импульсного воздействия при прохождении основания, а также характер контактного взаимодействия в опорах и

статоре. В расчетах используется разложение решения в ряд по собственным формам колебаний, а при выходе из контакта и входе в контакт попеременно решаются соответствующие уравнения со своими начальными условиями. Исследуются нестационарные колебания без контакта со статором. Разработана программа расчета.

Сравнение величин динамической реакции в системе ротор - опоры показало, что податливость опорной системы уменьшает величины перегрузок на 30-40%.

Шестая глава посвящена исследованию стационарных колебаний и динамической устойчивости системы «ротор - опоры ТА». Задача решается в линейной постановке, используя разложение в ряд по собственным колебаниям с последующим применением метода начальных параметров. Анализируются вынужденные колебания ТА при различной величине и расположении дисбаланса. Найдены нечувствительные скорости ротора, что очень важно для процесса балансировки. Определены условия устойчивости для разных вариантов конструкции ТА. Проведено исследование переходных режимов при внезапной разбалансировке в одном из пролетов.

В главе 7 представлены результаты экспериментальных исследований питательного турбонасосного агрегата (ПТНА) с гибкой пластической муфтой. Выявлено хорошее соответствие полученных расчетных и экспериментальных данных. В результате расчетно-экспериментального анализа удалось вывести резонансы ТА за рабочий диапазон. Моделирование процесса обката подтвердило его возникновение при выбеге ротора через резонансную зону.

При выполнении представленной диссертационной работы В.Ф. Шатохиным проделан большой объем трудоемких расчетно-теоретических и экспериментальных исследований, требующих высокой квалификации и опыта работы.

В диссертации имеются рекомендации по снижению опасности возникновения обката, в частности: отстройка от резонансных режимов, увеличение упруго-демпферных характеристик статора, применение оптимального выбора подшипников, порядок открытия регулирующих клапанов.

Основные результаты и оценка работы.

К научной новизне может быть, в первую очередь, отнесена разработка В.Ф. Шатохиным математических и физических моделей роторных систем при контакте со статорными элементами, максимально приближенных к реальным конструкциям. Учитываются упруго-демпферные характеристики статора, неконсервативные аэро-гидродинамические силы в элементах роторной системы, контактное взаимодействие со статором и опорами в нескольких точках. Автором детально изучен такой опасный режим как обкат ротором статора с обратной прецессией, найдены условия его самовозбуждения в случае упругости статора. Проанализирован часто встречающийся в практике эксплуатации нестационарный режим - внезапная разбалансировка в одном из пролетов.

Важным для практических применений является разработанный диссертантом достаточно универсальный программный комплекс для расчета турбогенераторов при различных условиях эксплуатации. Проведены расчёты реальных конструкций ТА с варьированием параметров. Разработаны рекомендации по снижению риска возникновения обката и принципиальная схема предотвращения катастроф ТА за счет снижения опасности развития аварийных ситуаций.

На основе разработанных диссертантом программных комплексов смоделировано и объяснено возникновение аварии на Каширской ГРЭС и Новочеркасской ГРЭС.

Тем не менее, по работе имеются следующие замечания:

1. На стр.109 автор пишет «переходные колебания начинаются с прямой прецессии и сопровождаются движением с ударами и отскоками». Однако при этом не приводится каких-либо условий соударения и характера удара между ротором и статором. А между тем именно эти условия и являются определяющими при дальнейшем движении ротора в зазоре после контакта со статором.

2. В главе 6 автор пишет, что для автоколебательных режимов необходимо иметь границы области устойчивости, при которых не нарушается работа роторной системы. Но, тем не менее, каких либо общих рекомендаций в работе нет. Исследована устойчивость лишь в частных случаях конкретных ТА. Однако области устойчивости могут оказаться довольно узкими. В частности, остается неясным вопрос об устойчивости работы роторной системы при контакте с упругим статором. С одной стороны, как было показано автором, упругость статора снижает риск появления обката, но насколько устойчива будет такая система и в каких частотных диапазонах?

3. В уравнениях (3.13), (3.14) и в уравнении движения (3.16) в выражении для силы сухого трения не учтен член $\chi m \varepsilon \dot{\varphi}^2$, отражающий воздействие на ротор центробежных сил от эксцентриситета. Это требует дополнительного разъяснения.

4. Неясно насколько справедливо пренебрежение весом ротора в расчетах. Так, автором получены траектории (рис. 3.19 а), в которых появляется определенная асимметрия траекторий, связанная с весом ротора. Известно, что в горизонтальных роторах при слабой смазке могут возникать маятниковые колебания по нижней части подшипника.

Имеется также ряд редакционных замечаний

1. Автор пишет «Понятие развития «синхронного» или «асинхронного» обката предполагает совпадение или несовпадение направления прецессионного движения ротора с направлением собственного вращения. Однако, понятие «синхронный» или «асинхронный» не определяет направления прецессии, а связано с наличием различных гармоник в сигнале. Асинхронный обкат может быть как с прямой, так и с обратной прецессией.

2. В гл. 3, 4 автор пишет, что рассматривает систему «ротор-статор». Но в диссертации статор предполагается безынерционным, его движение не рассматривается, а учитывается лишь его упруго-демпферная характеристика. Поэтому на самом деле рассматривается ротор с учетом упругости статорных элементов.

Но сделанные замечания не умаляют достоинств представленной диссертационной работы. Автором проделана большая расчетно-теоретическая и экспериментальная работа, выполненная им на высоком научном уровне с использованием современных расчетно-экспериментальных подходов, требующая высокой научной квалификации и точности исполнения. Достоверность полученных результатов подтверждается экспериментальными данными. Диссертация В.Ф. Шатохина является законченной работой, содержащей новые научные результаты и имеющей несомненную практическую ценность.

Считаю, что диссертация В.Ф.Шатохина «Колебания роторов турбоагрегатов с обкатом ротором статора при задеваниях (методы математического моделирования и

программные средства)» удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Виктор Федорович Шатохин заслуживает присвоения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.04.12 – Турбомашины и комбинированные установки.

Официальный оппонент

доктор технических наук по специальности 01.02.06,

главный научный сотрудник

ФГБУН Института машиноведения

им. А.А. Благонравова РАН

Л.Я. Банах

Л.Я.Банах

25.11.2014

Подпись руки Л.Я.Банах заверяю

Начальник отдела кадров



Э.Н. Петюков

Банах Людмила Яковлевна – главный научный сотрудник

Место работы: Федеральное Государственное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва 101990 Малый Харитоньевский пер. 4

E-mail: banl@inbox.ru