

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Шатохина Виктора Федоровича

"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 05.14.12 - "Турбомашины и комбинированные турбоустановки "

Обеспечение работоспособности и надежности турбоагрегатов (ТА) различного назначения является в настоящее время одной из приоритетных задач, стоящих перед проектирующими и эксплуатирующими их организациями. К сожалению, в практике эксплуатации ТА и до настоящего времени происходят аварийные ситуации, сопровождающиеся не только остановом работы ТА, но иногда разрушением, как самого турбоагрегата, так и окружающей его инфраструктуры. Нарушение нормальной работы ТА может произойти по самым различным причинам. Например, из-за нарушения механической прочности вращающихся элементов ТА, сопровождающееся обрывом лопаток, бандажей дисков компрессоров и турбин, ведущее к разбалансировке ротора, и его контакту со статорными элементами конструкции. Проблема касания в таких условиях чрезвычайно опасна из-за возможности появления режима обкатывания ротором статора (у автора диссертации - "обката"), связанного с появлением громадных сил трения, в отдельных случаях снижающих скорость прецессионного движения и даже смены ее знака. Последнее ведет, как правило, к катастрофической ситуации. Спроектировать конструкцию так, чтобы эта ситуация не произошла, или по крайней мере определить условия ее эксплуатации, одна из главных задач конструкторов.

Именно на решение этой крупной научно-технической проблемы и нацелена работа диссертанта, актуальность которой, не вызывает сомнений.

В диссертации представлены результаты долгих лет работы диссертанта в области разработки математических методов и средств моделирования конструкций ТА в условиях возможного действия различных факторов, ведущих к возникновению этого грозного явления. Надо отметить, что результаты работы диссертанта активно использовались и используются при проектировании большого числа ТА различного назначения на КТЗ.

Говоря о научной новизне работы надо сказать следующее. Работы в этом направлении ведутся на протяжении многих лет, как в России, так и за рубежом. Существует большое количество научных статей, посвященных исследованию явления обката в различных его проявлениях. Решаются конкретные задачи проектирования тех или иных ТА с целью недопущения этого явления или смягчения его последствий, в том числе и с использованием методов математического моделирования, различных алгоритмов и программ их реализующих. Поэтому, может быть, к использованию в диссертации фраз типа «...не имеют аналогов», или «...впервые показано...». следовало бы подходить более аккуратно.

Главное в работе то, что до настоящего времени в литературе не встречалось единовременно такого полного описания и исследования этой важнейшей задачи роторной динамики. Автором изучены причины возникновения обката, последовательно, просто и ясно, на большом количестве примеров показан процесс его развития, определены значения всех параметров сопровождающих обкат, а также условия выхода к самому опасному явлению обката - обратной прецессии ротора. Приведен предельно ясный математический аппарат, позволяющий на различных этапах развития этого явления подробно описать поведение роторной системы ТА. И наконец, с его помощью и разработанного программного обеспечения в работе исследованы и описаны условия, которые в той или иной степени способствуют обкату, либо его гасят.

Алгоритмы, разработанные диссертантом, позволяют решать задачи для многоопорных роторов при возникновении контактов ротора и статора в

нескольких сечениях, с учетом циркуляционных гидродинамических сил в опорных подшипниках скольжения, как в стационарной, так и нестационарной постановке. С учетом вышесказанного несомненна и практическая ценность работы, результаты которой использовались в решении конкретных задач проектирования Калужского Турбинного завода на протяжении многих лет.

Кратко о содержании диссертационной работы и сопровождающих его замечаниях.

Во введении автором приводятся примеры и статистика нарушения работоспособности турбоагрегатов различного назначения и мощности, обосновывается актуальность проблемы контактных взаимодействий ротора и статора и необходимость ее глубокого исследования с целью уменьшения тяжести последствий аварийных ситуаций. Рассматривается используемая в диссертации терминология, дается краткое описание содержания глав диссертации, формулируются цель, задачи диссертационной работы, научная новизна, ее практическая значимость, дается структура работы.

В первой главе представлен обзор большого количества работ, посвящённых рассматриваемым в диссертации вопросам и задачам стационарной и нестационарной динамики роторных систем. Приводятся имена ученых, внесших свой вклад в развитие этой науки, как в теоретической, так и прикладной части. Рассматриваются методы и алгоритмы, используемые в решении практических задач роторной динамики. Впечатляет, проведенный автором, анализ аварий ТА, связанных с развитием явления обката, еще раз подтверждающий актуальность и важность представленной к защите работы. В заключительной части главы приведен анализ исследований контактных взаимодействий в ТА, представленных в работах российских и зарубежных ученых. Здесь же автор еще раз определяет основную цель диссертационной работы – “разработка новых методов математического моделирования стационарных и нестационарных колебаний роторов ТА с возможностью определения

реакции ротора на разные воздействия и исследование малоизученного явления обката ротором статора”.

Во второй главе рассматриваются нестационарные колебания ротора после внезапной разбалансировки при отсутствии задеваний о статор. Показываются результаты решения нескольких классических задач нестационарной динамики вращающегося ротора. Решения представлены в виде орбит движения модели ротора при разных соотношениях жесткостных и демпфирующих коэффициентов.

Задача имеет как академический интерес, так и некоторый практический, о котором говорит автор. Вместе с тем разбалансировка ротора в эксплуатации (тем более внезапная) не подчиняется некоторым заранее просчитанным неуравновешенностям, при которых не будет контакта или сил, выводящих ротор на обкат. Это же замечание частично относится и к главе 4, где устанавливается опасность разбалансировки по некоторому критерию.

К другим замечаниям по главе можно отнести некоторые небрежности оформления (разные обозначения эксцентриситета ротора на рисунке 2.1, в уравнениях (2.3), (2.5) и в тексте).

В третьей главе автор исследует нестационарные колебания ротора при его контактах со статором. Представлена общая методика исследований и результаты, полученные для разных моделей роторов в условиях контакта с жестким и податливым статором. Для податливого статора в точку контакта введен амортизирующий пакет, обладающий в общем случае нелинейной жесткостью и демпфированием.

В общем случае этот пакет может отражать две физические сущности - либо это деформация контактирующих поверхностей вала и статора, либо это податливость самого статора. В первом случае задается только локальная жесткость для статора. В то же время контактная жесткость вала имеет такое же влияние на процесс деформации и ее восстановления, как и у статора. В связи с этим возникает вопрос - почему только контактная

жесткость статора? Здесь же и другие вопросы - как определяется жесткость связи, моделирующей податливость статора? В каких случаях можно пренебрегать динамической жесткостью статора и свести задачу к статической? Можно ли таким пакетом одновременно учитывать и контактную жесткость и податливость статора?

Автор обосновывает вывод о том, что радикальным способом стабилизации амплитуд колебаний при развитии обката является увеличение демпфирования в статоре, однако не приводит каких либо комментариев о том, как это сделать и в каких случаях.

Уравнения движения ротора при задеваниях о статор построены путем включения в них проекций сил нормального давления и силы трения в контактной точке. Вместе с тем представляет интерес включение в разрешающую систему уравнений(3.16) уравнения, учитывающего изменение количества движения ротора при действии внешних сил, и позволяющего получить изменение частоты вращения ротора при его обкате в процессе интегрирования уравнений. Весьма интересна аналогия дестабилизирующих сил в контакте, приводящих к асинхронному обкату, с циркуляционными силами в подшипниках скольжения.

В заключительной части главы представлена структура программного модуля исследования переходных колебаний ротора после внезапной разбалансировки с задеванием и без задеваний о статор, а также результаты расчетных исследований на базе разработанных алгоритмов. Интересен вывод о том, в процессе обката частота прецессионного движения уравновешенного ротора увеличивается до предельного значения, совпадающего с собственной частотой системы "ротор-опоры-статор".

Показывается изменение во времени основных характеристик движения ротора после внезапной разбалансировки. Среди них: траектория движения ротора; угловая скорость прецессионного движения ротора; сила нормального давления на статор; перемещения ротора с учетом деформации статора; скорость ротора относительно статора в точке контакта,

коэффициенты контактной жесткости; угловая частота вращения ротора. Приводится классификация развития процесса обката для разных случаев. Исследуется влияние различных факторов на развитие обката, наконец, исследуется движение ротора при разбалансировке на режимах близких к резонансным и т.д. Весьма важен раздел об определении времени срабатывания автоматической защиты с недопущением разрушающих сил в работающем агрегате.

В качестве общего замечания можно отметить, что глава перенасыщена большим количеством примеров и объяснений тех или иных явлений, в том числе и повторяющихся, возникающих в процессе обката ротора о статор. Тем более что аналогичные выводы повторяются и в последующих главах работы.

В четвертой главе автором рассматривается движение многоопорных роторов после внезапной разбалансировки. Модели роторов формируются в стержневой постановке, но с формированием глобальной динамической матрицы, так как это делается в МКЭ программах. Конечными элементами являются балки и пружины. Основная цель данной главы показать на примере многоопорных роторов возможность использования разработанных алгоритмов и программных средств в моделировании соответствующих объектов и расчетном анализе. В главе в целом повторяются результаты и выводы третьей главы, но уже для роторов, приближенным по своей геометрии и условиям опирания к реальным конструкциям. Рассматриваются вопросы возникновения контактов в различных сечениях ротора, участия подшипников скольжения в динамике обката и другие.

К замечаниям можно отнести перегруженность главы объяснениями алгоритма формирования уравнений движения. Можно было бы просто сослаться на метод – МКЭ на базе стержневых элементов, метод начальных параметров и т.д.

При сравнении результатов, полученных разными алгоритмами в таблице 4.1, было бы уместно объяснить, при каких значениях коэффициента

сдвига получено решение в методе начальных параметров и МКЭ, использующих гипотезу плоских сечений.

Автором говорится об учете аэродинамических сил в процессе возникновения обката, однако каких-либо результатов с ними не приведено.

В пятой главе рассмотрены нестационарные колебания системы ротор-опоры с несколькими опорами при "сотрясении" основания, т.е. при кинематическом воздействии на ротор со стороны основания (фундамента).

Автором отмечается, что реакция ротора ТА на импульсное кинематическое воздействие в виде взрыва, землетрясения является одной из важнейших характеристик сохранения работоспособности ТА специального назначения. С ним можно полностью согласиться. Приводится математика, позволяющая получить уравнения движения в условиях импульсного кинематического воздействия.

К замечаниям по главе можно отнести следующие. Неудачно использование словосочетания "сотрясение основания". Лучше было бы использовать более общепринятые - импульсное возбуждение, кинематическое возбуждение, сейсмическое возбуждение, наконец, ударная волна. Тем более что автор сам постоянно переходит к общепринятым и расшифровывает это словосочетание.

Автором отмечаются различные источники возбуждения основания, которые могут привести к контактам ротора и статора. Однако в дальнейшем рассматривает только одночастотное воздействие на основание, либо одиночный импульс. Вместе с тем, для ТА большой интерес представляет многочастотное возбуждение (например, сейсмическое) с плотным спектром воздействия (спектром виброускорений), причем в различных направлениях. Такое воздействие является весьма опасным из-за появления больших перемещений на собственных частотах, ведущих к обкату. К сожалению, отсутствуют какие-либо результаты, показывающие возможность выхода ротора на обкат при кинематическом возбуждении.

По поводу начальных условий для вращающегося ротора при импульсном возбуждении. Можно начинать интегрирование на любой частоте вращения при отсутствии импульса. Требуется только некоторое время, чтобы погасить начальные возмущения от интегратора, от дисбаланса, силы веса... и подойти к моменту импульса с устойчивым движением.

В шестой главе автором рассматриваются методы расчета стационарных систем в линейной постановке - частот и форм собственных колебаний (метод начальных параметров), вынужденных колебаний от неуравновешенных сил (метод разложения по формам собственных колебаний - модальный метод), приводится методика оценки устойчивости системы в условиях действия циркуляционных сил. Приводятся результаты расчета многоопорного ротора. Рассматривается нестационарная задача о поведении ротора при внезапной разбалансировке.

К замечаниям можно отнести описки по тексту главы (таблица 6.1).

В седьмой главе сопоставлены результаты исследований, приведенные в диссертации, с результатами других авторов и результатами. Автором предложена архитектура системы предотвращения катастроф ТА (набор решаемых задач и их последовательность при проектировании ТА), позволяющая снизить риски возникновения аварийных ситуаций в эксплуатации.

Замечания, которые можно отнести не только к одной какой-либо главе. В диссертационной работе много выражений с параметрами, которым автор дает только словесное описание, и отсылает читателя к внешним источникам (как чужим, так и со своим участием) для понимания их математической формы и условий их получения. Например, в главе 4 это касается уравнения 4.15, в котором участвуют матрицы жесткости для получения венцовых и лабиринтных сил, подшипников скольжения. По тексту присутствуют только обозначения коэффициентов этих матриц.

По поводу различных уравнений движения для различных движений ротора - в зазоре, с контактом, с различным возбуждением и т.д. По мнению оппонента можно иметь одну систему уравнений, описывающую движение ротора в любой момент времени и в любых условиях. Например, в таком виде:

$$[M] \cdot \{\ddot{q}(t)\} + [C] \cdot \{\dot{q}(t)\} + [K] \cdot \{q(t)\} = \{F_d(t)\} + \{R_s(t)\} + \{A_s(t)\} + \{S_g(t)\} + \{W\}$$

где: $[M], [C], [K]$ – глобальные матрицы инерции, демпфирования и гироскопии, жесткости роторной системы соответственно, полученные для дискретной стержневой конечно-элементной модели; $\{\ddot{q}(t)\}, \{\dot{q}(t)\}, \{q(t)\}$ – векторы-столбцы ускорения, скорости, и перемещения соответственно; $\{F_d(t)\}$ – вектор-столбец сил от неуравновешенности; $\{R_s(t)\}$ – вектор-столбец реакций от подшипников; $\{A_s(t)\}$ – вектор-столбец реакций от аэродинамических сил; $\{S_g(t)\}$ – вектор-столбец сейсмических сил; $\{W\}$ – гравитационные силы.

По поводу определения шага интегрирования. Для ускорения счета начинать интегрирование можно и с грубых временных шагов. А чтобы не потерять точность можно использовать адаптивные методы определения временного шага в работе интегратора.

К общему замечанию по оформлению можно отнести невысокое качество отдельных рисунков по главам.

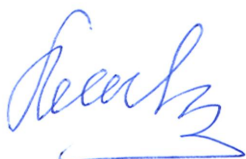
Замечания, приведенные в отзыве, не снижают общей ценности диссертационной работы. Результаты работы могут быть рекомендованы к использованию в конструкторских бюро, ведущих проектирование турбоагрегатов различного назначения.

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации. Основные результаты диссертационной работы достаточно полно отражены в публикациях автора и автореферате. Список из 41-ой работы, опубликованных на протяжении длительного периода деятельности диссертанта в области проектирования турбоагрегатов различного назначения говорит о высокой квалификации диссертанта.

Работа является законченной научно-квалификационной работой, в которой разработаны теоретические положения и на их основании внедрены технические решения, обеспечивающие вибрационную надёжность турбоустановок, что является значительным вкладом в совершенствование оборудования энергетической отрасли страны.

Учитывая актуальность, научную и практическую значимость диссертационной работы, её соответствие требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» в редакции Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к докторским диссертациям, считаю, что **её автор, Шатохин В.Ф. заслуживает присвоения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.12 - "Турбомашины и комбинированные турбоустановки"**

Официальный оппонент,
доктор технических наук,
профессор кафедры "Конструкция и проектирование двигателей"
Московского авиационного института (МАИ)



20.11.2014

М.К. Леонтьев

Почтовый адрес: Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, А-80, ГСП-3, 125993,
Факс: +7 499 158-29-77. Электронная почта: mai@mai.ru

Подпись Леонтьева М.К. заверяю.

Декан факультета "Двигатели летательных аппаратов" МАИ

А.Б. Агульник

