

В диссертационный совет
Д 212.125.05 при ФГБОУ ВО «Мос-
ковский авиационный институт
(национальный исследовательский
университет)» 125993, г. Москва, Во-
локоламское шоссе, д. 4

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу Насонова Дмитрия Александровича "Методология расчета и динамический анализ турбозубчатых агрегатов главного привода судовых гребных винтов», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

Актуальность темы.

Актуальность избранной диссертантом темы не вызывает сомнений. Проблема уменьшения акустического излучения подводных и надводных судов за счет снижения вибраций главного турбозубчатого привода (ГТЗА), где наиболее сложным и проблематичным является редуктор, до сих пор актуальна, так как минимальные виброшумовые параметры системы «турбина-редуктор-гребной вал» определяют скрытность и безопасность положения объектов. Используемый в последние годы в судовых энергетических установках планетарный редуктор наиболее мощный и многокомпонентный источник вибрации, передаваемой на винт и излучаемой в окружающую среду. А уровни вибрации, мощных планетарных редукторов многих современных судовых энергетических установок не соответствуют предъявляемым к ним требованиям.

Необходимость обеспечения равномерного распределения мощности по параллельным потокам и по зубчатым зацеплениям заставляет решать многократно статически неопределимые задачи для определения параметров динамических моделей, что и определяет высокую трудоемкость и сложность системы для расчета. Ранее разработанные многочисленные методы, основанные на стержневых моделях, к решению поставленных задач



численного исследования динамических характеристик систем с редукторными элементами практически не применимы. Потребовались другая постановка задачи и разработка новой методологии, а также более совершенных математических моделей для расчетного анализа турбозубчатых агрегатов, что еще более подчеркивает актуальность выбранной темы диссертации. Особенность исследовательской работы заключается еще в том, что не всегда удобно использовать закрытые западные комплексы, в которых трудно учесть особенности конструкции и невозможно изменить или дополнить желаемым образом алгоритм расчета. Поэтому актуальность данной работы связана так же с тем, что, наряду с использованием проверенного импортного программного продукта типа комплекса «ANSYS», выполнена разработка специализированного отечественного продукта, математическая основа которого ничем не хуже известных импортных комплексов. Работа выполнена на стыке научных исследований и инженерного вычислительного эксперимента применительно к сложным системам типа ГТЗА.

**Степень обоснованности научных положений,
выводов и рекомендаций.**

Диссертант уделил значительное внимание вопросам оценки точности расчетных исследований и адекватности разработанных моделей. В соответствующих главах имеются параграфы, посвященные верификации расчетов, модели и программного продукта.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, как частично показано в автореферате, основана:

- на достаточно корректном использовании автором выверенных классических математических моделей и методов, а также уравнений динамики систем;

- на использовании в процессе исследований проверенного программного комплекса «ANSYS»;

- на методах оптимизации конечно-элементной сетки с точки зрения получения минимальных вычислительных погрешностей.
- на специально подобранных тестовых задачах, для проверки программного обеспечения и разработанных моделей;
- на соответствии полученных автором собственных результатов расчетов экспериментальным данным, а так же результатам, полученным другими авторами.

Вместе с тем, следует указать на резервы повышения точности моделирования путем совершенствования моделей подсистем, например, подсистемы смазки подшипников скольжения.

Оценка новизны выполненной работы.

Научная новизна заключается в следующих положениях:

- предложен комбинированный подход к моделированию турбозубчатого агрегата, при котором часть конструкции моделируется с использованием МКЭ, а остальная часть представляется аналитическими или эмпирическими характеристиками;
- впервые в конечно-элементной модели редуктора он моделируется не с помощью контактных элементов, что приводит к существенному росту требований к вычислительным ресурсам, а с помощью набора эквивалентных пружин, характеристики которых определяются непосредственно при построении модели в программе, написанной на специальном для «ANSYS» языке APDL. Такой подход не просто позволил сэкономить вычислительные ресурсы, а сделал принципиально возможным проведение подобных расчетов на доступных ПЭВМ;
- признаками новизны обладают результаты исследований динамических характеристик ГТЗА, в том числе результаты влияния податливости и асимметрии жесткости элементов сателлитного узла на динамические свойства планетарного редуктора, а так же выявлено влияние податливости во-

дила на формирование осевых колебаний планетарного редуктора с шевронным зацеплением и др;

- впервые сформулированы критерии корректности использования свойств циклической симметрии в расчетах форм резонансных колебаний, что позволяет оценивать достоверность расчетных форм колебаний циклически симметричных систем, например, лопаточного аппарата турбинных колес.

Впервые диссертантом предложена методика коррекции геометрии осей сателлитов планетарного редуктора по результатам КЭ-анализа сателлитных узлов, что позволяет уменьшить (устранить) перекосы и снизить уровень максимальных контактных напряжений в зацеплениях.

Новые результаты, полученные диссертантом, имеют большое значение для науки и практики в области проектирования и обеспечения надежности и безопасности судовых транспортных энергетических установок. При этом в работе новизны несколько больше, чем это представлено автором в реферате.

Оценка личного вклада автора.

Автору принадлежат следующие результаты: постановка задач, разработка методологии исследования с применением стандартных и оригинальных пакетов на базе МКЭ, разработка и построение математических моделей, разработка методик конечно-элементного моделирования ГТЗА и его компонентов, алгоритмов и программного обеспечения. Автор принимал участие во внедрении разработанного ПО на промышленных предприятиях. Личный вклад автора значителен и характеризуется тем, что из 52 публикаций 13 выполнены без соавторов, а в значительной части других он является первым автором.

Практическая ценность результатов диссертационной работы

Разработанная методология исследования и математические модели открывают новые возможности для исследования динамики последующих образцов изделий типа турбозубчатых агрегатов и аналогичных установок из смежных областей. Предложенные решения позволяют исследовать влияние различных конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров на динамику и надежность сложной системы и оптимизировать конструкции.

На основе исследований типового ГТЗА даны рекомендации по оптимизации его конструктивных параметров и снижению уровня вибрации на частоте пересопряжения зубьев до минимально-возможных значений, определяемых современной технологией;

Расчетный анализ сателлитных узлов редуктора, выполненный по методологии диссертанта позволяет выявить недостатки конструкции типа жесткостной асимметрии приводящей к перекосам и нарушению контактов в зубчатых зацеплениях новейшего типа. Предложенная диссертантом коррекция геометрии проточек осей сателлитов позволяет снизить уровень максимальных контактных напряжений в зацеплениях на 6-8%.

Для оценки динамических характеристик рабочих колес на стадии проектирования разработан и адаптирован под конкретное производство узкоспециализированный конечно-элементный программный комплекс для расчета собственных колебаний рабочих колес турбин.

Многие выводы, методики моделирования и анализа, изложенные в работе, применимы для исследования авиационных, энергетических, турбозубчатых агрегатов различных отраслей народного хозяйства.

Значимость полученных результатов для дальнейшего развития науки.

Во-первых, автор фактически не только предотвратил вымирание научной школы, основанной его учителем проф. Борискиным О.Ф. для специалистов по численному анализу колебаний сложных роторных систем,

но и обеспечил поступательное развитие этой школы, о чем говорят его многочисленные выступления на конференциях, а так же индивидуальные и в соавторстве публикации в отечественных и зарубежных изданиях.

Во-вторых, разработанная методология даст возможность делать следующие шаги в области исследований и совершенствования таких сложных конструкций, как турбозубчатые агрегаты для привода судовых винтов, турбоагрегаты ТЭС и АЭС, энергетические установки для ГПА и т.п.

Основные положения диссертации нашли отражение в публикациях автора высокого качества, в том числе в монографии на 167 стр. Реферат диссертации полностью отражает основные выводы и научные положения, выдвинутые в тексте диссертации.

Замечания и пожелания, возникшие в процессе изучения представленных материалов, в том числе:

1. В автореферате (стр. 4) и в тексте диссертации (стр. 4) формулируется цель работы, как «снижение уровня вибрации при проектировании малощумных ГТЗА». Следует уточнить, что основная цель работы более общая – обеспечение и повышение вибрационной надежности при проектировании малощумных ГТЗА. А снижение уровня вибрации – это часть более общей задачи повышения надежности при проектировании и доводке ГТЗА.

2. Для лучшего прочтения текста диссертации следовало бы дать перечень обозначений.

3. Не совсем корректно выполнены ссылки на работы МЭИ (стр. 12 автореферата), так как разработанный программный комплекс МЭИ, состоящий из нескольких независимых сложных программных продуктов, не является аппаратным и разработан не столько для центровки и балансировки валопроводов, а прежде всего для решения задач вынужденных колебаний многоопорных валопроводов от неуравновешенностей и несовершенств

сборки полумуфт, а так же для анализа устойчивости движения валопровода на масляной пленке с учетом эксплуатационных расцентровок и других технологических отклонений. Этот комплекс, наряду с другими программными комплексами (для расчета крутильных колебаний, реакций опор и напряжений в элементах роторов и муфт) до сих пор используется на ЛМЗ при проектировании одновалных турбоагрегатов ТЭС и АЭС.

4. Источники вибрации, указанные в тексте диссертации на рис. 1.1 и (стр. 12,13) недостаточно полные, следовало бы привести отдельную таблицу с перечнем кинематических и динамических возмущений, вызывающих вынужденные колебания, низкочастотные вибрации, связанные с потерей устойчивости роторов на масляной пленке, а также другие виды вибраций.

5. Там, где рассматриваются источники вибрации валопровода, из текста не ясно, идет ли речь о несовершенствах стыковки полумуфт валопровода (кинематическое возмущение вынужденных колебаний типа «коленчатость» или «излом осей при стыковке полумуфт»). Или речь идет о расцентровках роторов по полумуфтам, которые вызывают изменение динамических свойств элементов и системы в целом (критических частот, запасов устойчивости и пр.).

6. В представленных моделях отсутствует подробная информация о том, как моделируется масляная пленка подшипников, которая не только определяет динамические свойства роторных систем, но может явиться источником самовозбуждающихся колебаний роторов с одной из низших частот в системе или субгармонических колебаний с частотами $\frac{1}{2}$; $\frac{1}{3}$; $\frac{1}{4}$; и т.д. По крайней мере, эти вопросы важны, что бы о них упомянуть в обзоре.

7. Один из недостатков в оформлении работы – отсутствие при описании модели и соответствующих уравнений структуры демпфирующих и возмущающих сил, как в масляном слое подшипников, так и в муфтах, зубчатых соединениях, газодинамическом потоке. Не следовало в прило-

жении 1 приводить известные из многочисленной литературы соотношения теории упругости и метода конечных элементов, тем более что там содержатся только упругие и инерционные элементы.

8. На стр. 17 автореферата отмечено, что «предложен оригинальный способ моделирования подшипников скольжения сателлитного узла...». Однако нет достаточных пояснений, о каких характеристиках подшипников идет речь, какие физическая и математическая модели соответствуют этому предложению, не пояснено.

9. На стр. 31 говорится о возмущениях аксиальных и тангенциальных форм рабочего колеса, но не раскрывается физическая природа возмущений и их характер.

10. На стр. 30-32 автореферата и в тексте диссертации (глава 5) рассматриваются вопросы обеспечения динамической надежности на примере изгибно-крутильных колебаний венца рабочих лопаток, расположенных на модели диска турбины, в том числе приводится Кэмпбелл-диаграмма. Но нет в данном случае законченности примера, так как не приведены нормы отстройки и не дана оценка надежности конкретного венца. А если бы это рассматривалось вместе с нормами на отстройку, то вероятно отпали бы рассуждения, какие колебания совершают лопатки, в зависимости от положения узловых диаметров. Частоты по разным формам близкие и отстройка при близости рабочей частоты к резонансной частоте производится от всей группы форм, изгибных, крутильных или изгибно-крутильных.

11. Не ясно, по какому принципу был вставлен единственный фрагмент разработанного программного обеспечения – блока расчета матриц для элемента со смешанной линейно-кубической аппроксимацией перемещений с присовокуплением известных процедур обращения матриц и вычисления определителей MINV и MINV2 , на которые достаточно было сослаться.

12. Выводы по работе можно сделать более фундаментальными и более обширными. Часть выводов по главам следовало бы вынести в итоговое заключение.

13. Следовало бы обозначить, какие еще задачи необходимо решить в рамках заявленного отечественного комплекса для обеспечения требований к «виброшумовым характеристикам ГТЗА». Например, выпали из рассмотрения вопросы обеспечения устойчивости движения на масляной пленке роторов и валопровода ГТЗА с учетом конструктивных и эксплуатационных отклонений, вопросы задеваний и др.

Отмеченные недостатки не снижают качество выполненной работы и не влияют на главные теоретические и практические результаты диссертации.

Заключение.

Диссертация Насонова Д.А. является законченным комплексом научно-квалификационных исследований, выполненных автором в значительной части самостоятельно и, несмотря на отмеченные недостатки, на высоком научном уровне. В работе приведены научные результаты, позволяющие ее квалифицировать как решение крупной научно-технической проблемы, решение которой вносит значительный вклад обеспечение безопасности, надежности судовых энергетических установок в целом, а так же скрытности подводных аппаратов. Новые научные результаты, полученные диссертантом, имеют существенное значение для российской науки и практики в области проектирования и обеспечения надежности и безопасности судовых транспортных энергетических установок.

Работа написана доходчиво, грамотно и аккуратно оформлена. По главам и в заключении сделаны ясные и обоснованные выводы. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации, а ее материалы с избытком приведены в многочисленных публикациях.

На основании изложенного считаю, что диссертационная работа "Методология расчета и динамический анализ турбозубчатых агрегатов главного привода судовых гребных винтов», отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Насонов Дмитрий Александрович, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

Официальный оппонент

д.т.н., начальник центра мониторинга
и технической диагностики в энергетике
ООО «НПЦ ДИНАМИКА»



Куменко А.И.

Почтовый адрес: дом. 111020, Москва, Наличная ул. Д.5, кв. 185.

Телефоны: дом. 8-499-763-48-50; моб. 8-915-230-59-80;

e-mail: A2008kai@mail.ru

Место работы: ООО «Научно производственный центр «ДИНАМИКА»,
Московский офис;

Адрес: г. Москва, . Ольховская ул., д. 21/25 оф. № 2.

Подпись руки Куменко А.И. удостоверяю:

Старший менеджер Московского офиса



Дербенева Е.Н.

