

В диссертационный совет Д 212.125.05 при
ФГБОУ ВО «Московский авиационный ин-
ститут (национальный исследовательский
университет)»
125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

ОТЗЫВ

официального оппонента д.т.н., проф. Крюкова В.А. 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

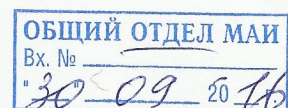
1. Актуальность темы диссертационной работы.

Известно, что зубчатые передачи большой мощности являются основными источниками вибрации в силовых установках. Снижение уровня вибрации силовых корабельных установок и связанное с этим улучшение виброшумовых параметров кораблей, безусловно, на сегодняшний день является одной из важнейших проблем, решение которой влияет на обороноспособность страны.

Главный турбозубчатый агрегат (ГТЗА), выбранный в качестве объекта исследования в данной работе, представляет собой сложную механическую систему, большинство элементов которой являются источниками вибрации. Основным методом исследования таких систем и выбора на основе результатов этого исследования рациональных параметров этих систем – математическое моделирование. Однако существующие математические модели планетарных редукторов и других элементов, входящих в состав исследуемого агрегата, исчерпали свои возможности и, следовательно, тема диссертации, посвященная совершенствованию научных основ и разработке на этой основе новых инструментальных средств проектирования главных турбозубчатых агрегатов является актуальной.

2. Общая оценка содержания и оформления работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 298 наименований трех приложений. Общий объем диссертации без приложений составляет 262 страницы, в том числе диссертация содержит 26 таблиц и 113 рисунков.



Во *введении* (стр. 4-9) обоснована актуальность избранной темы диссертации, основные направления научных исследований и приведена общая характеристика работы.

В *первой главе* (стр. 10-26) выполнен обзор работ по исследованию и конструированию турбозубчатых агрегатов и их основных элементов. Обозначены основные, но далеко не все источники вибрации в турбозубчатых агрегатах и существующие способы борьбы с ними. Особое внимание уделено планетарным редукторам в составе ГТЗА, как основным источникам вибраций. Проведен сравнительный анализ методов, используемых для уменьшения уровня вибраций. В качестве основного метода для исследования колебаний в рассматриваемых объектах предложено использовать математическое моделирование на основе метода конечных элементов. Выполнен обзор работ в области конечноэлементного анализа роторных систем, валопроводов и планетарных редукторов.

На основе выполненного анализа формулируется цель работы и задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели.

Во *второй главе* (стр. 27-113) основное внимание уделяется методологии моделирования динамических процессов в мощных планетарных редукторах, являющихся одним из основных и наиболее сложных элементов ГТЗА. Описывается схема реального редуктора конструкции Калужского турбинного завода, выбранного в качестве объекта исследования. Подробно анализируются его основные компоненты (корпус, элементы кинематической цепи: зубчатые зацепления, водило, подшипники скольжения, муфты, валопроводы и др.) и разрабатываются их модели. Используемый соискателем комбинированный подход к моделированию редуктора, при котором часть конструкции моделируется с помощью метода конечных элементов, а часть – на основе известных или полученных на основе аналитических или экспериментальных исследований зависимостей, следует считать перспективным и обоснованным, т.к. он позволил автору создать наиболее простую модель рассматриваемого объекта, адекватно отображающую динамические процессы, происходящие в нем, и, в то же время, снизить требования к вычислительным ресурсам и влияние ошибок округления на результаты моделирования. При этом автор на первое место ставит требования к вычислительным ресурсам. Это не совсем верно. На современном этапе развития вычислительной техники вопрос экономии вычислительных ресурсов не является наиболее актуальным. На мой взгляд, главное здесь – уменьшение объема вычислений, снижение погрешности вычислений в следствии ошибок округления, которые могут привести не только к количественным, но и качественно неверным результатам.

На основе подробного сравнительного анализа собственных колебаний редуктора в сборе и отдельно системы подвижных звеньев, проведенного с использованием созданной автором модели, дана оценка вклада отдельных частей редуктора в общие колебания.

Выполнен анализ влияния системы подвеса и амортизации редуктора на колебания и доказано существенное влияние жесткости крепления на некоторые формы колебаний редуктора в нижней части спектра.

Для проверки адекватности предложенных моделей проведено моделирование динамики редуктора в составе испытательного стенда. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показало хорошее их качественное соответствие.

В *третьей главе* (стр. 114-144) рассматривается моделирование турбоагрегата в составе ГТЗА. Изложены особенности методики моделирования роторных систем, обоснован выбор конечных элементов из библиотеки ANSYS. На основе тестовых расчетов сравнительно простых объектов проведена оценка качества предлагаемой модели. Использование созданной модели позволило выявить особенности колебаний рассматриваемой роторной системы.

Предложенные упрощения модели основаны на особенностях совместных колебаний вала и закрепленного на нем диска. Из рассмотрения исключается спектр собственных колебаний ротора не входящий в исследуемый, достаточно узкий диапазон частот, а также собственные колебания рабочего колеса, не распространяющиеся далее по ротору. Это безусловно недостаток модели, хотя, если исследуется виброактивность именно редуктора в составе ГТЗА, такой подход вполне быть оправдан. Как и в предыдущей главе к основным достоинствам модели автор относит экономию вычислительных ресурсов.

В *четвертой главе* (стр. 145-175) приводятся результаты исследований динамики планетарного редуктора в составе ГТЗА, выполненные на основе методики и модели, разработанных ранее. Подробно анализируется возможность взаимной компенсации возмущающих сил в зацеплениях, влияние неравномерности нагрузки по сателлитам на динамику системы, возможность и необходимость корректировки фазовых соотношений возмущающих сил со стороны эпицикла и солнечной шестерни, влияние перекоса в сателлитных узлах на динамику системы. На основе проведенных подробных исследований автором доказана возможность уменьшения уровня вибраций и даны конкретные рекомендации для реализации этого уменьшения.

Основным содержанием *пятой главы* (стр. 176-229), по утверждению автора, является разработка собственного программного обеспечения. Разработку программного обеспечения он также включил в основные итоги выполненных исследований (стр. 231). Это не совсем верно. Несомненно разработка собственного импортозамещающего программного обеспечения имеет практическую ценность, но в данном случае программное обеспечение является только средством для исследований. Основным в этом разделе, на мой взгляд, являются исследование сходимости вычислительных процессов, исследование колебаний турбинных лопаток, выявление особенностей динамических характеристик рабочего колеса, обоснование критериев корректности использования свойств циклической симметрии в динамических расчетах и

определения области применения методики расчета систем с учетом свойств циклической симметрии.

Каждая глава диссертации заканчивается параграфом, озаглавленным «Выводы и рекомендации». На самом деле в этих параграфах, в основном, изложены полученные результаты и даны некоторые рекомендации (см. ниже, п. 5 «Основные замечания»).

Приведенные в *заключении* (стр. 230-232) итоги выполненных работ и перспективы дальнейшей разработки темы вполне соответствуют тексту содержательной части диссертации.

Текст диссертации и автореферата написан технически грамотным языком, стиль изложения - научный и корректный.

Содержание автореферата соответствует тексту диссертации.

Результаты работы доложены на ряде общероссийских и международных конференций, рассматривались на научных семинарах Калужского филиала Московского государственного университета им. Н.Э. Баумана, Московского энергетического университета, Тульского государственного университета, а также на Ученом совете ОАО «Калужский турбинный завод» и НТС отдела виброакустики ИМАШ РАН.

3. Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается представительным объемом анализируемой информации по различным аспектам рассматриваемой проблемы, использованием классических положений механики и математического аппарата, апробированного программного обеспечения, проведением тестовых расчетов и сравнением полученных результатов с экспериментальными данными.

4. Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Научная новизна работы заключается в комбинированном подходе к моделированию ГТЗА, при котором часть конструкции моделируется с помощью метода конечных элементов, а часть – на основе известных или полученных на основе аналитических или экспериментальных исследований зависимостей. Это позволило автору создать наиболее простую модель рассматриваемого объекта, адекватно отображающую динамические процессы, происходящие в нем, и, в то же время, снизить требования к вычислительным ресурсам и влияние ошибок округления на результаты моделирования.

5. Основные замечания по диссертации и автореферату.

1. При построение расчетной модели зубчатого зацепления (стр. 146) автор учитывает только динамические составляющие сил, действующих в зацеплении. Не учет постоянной составляющей нагрузки является довольно

грубым допущением и может привести не только к количественным, но и качественным ошибкам. Этим может объясняться увеличение отклонения расчетных графиков от экспериментальных на рис. 2.63 при увеличении нагрузки.

2. Автор ограничился исследованием только одной конкретной схемы ГТЗА (типовая конструкция, производства ОАО «Калужский турбинный завод»), что несколько снижает общность полученных выводов.

3. В тексте диссертации и в автореферате говорится, что достоверность полученных результатов, научных положений, выводов, и рекомендаций в числе прочего обоснована сравнением с результатами, полученными другими авторами. Судя по всему, это относится к разделу 5.3, где на стр. 205 и 206 упоминаются тестовые объекты, для которых есть результаты исследований, полученные другими авторами (имеются ссылки на соответствующие источники). Однако, в тексте диссертации не приведены результаты тестовых расчетов, полученные автором и их сравнение. И хотя результаты упомянутых расчетов и их оценка приводятся в одной из опубликованных соискателем работ (монография соискателя стр. 52-53, 58-59, 64-65, 99), что действительно подтверждает достоверность численных исследований, тем не менее, в данном разделе следовало бы привести данное сравнение или сослаться на указанную работу. Отсутствие данной ссылки сильно затруднило оценку достоверности результатов этого раздела.

4. В ряде случаев автор опускает промежуточные выводы и доказательства. Так на стр. 171 приводится формула для расчета смещения, обеспечивающего предлагаемую автором фазовую коррекцию. Вывод данной формулы отсутствует; не указано, какой модуль входит в формулу: окружной или нормальный.

5. Структура диссертации и изложение материала далеки от совершенства. В наибольшей степени это относится к выводам. Выводы по работе в целом отсутствуют. Выводы по разделам носят декларативный характер и на самом деле представляют собой результаты работы (стр. 113 «...разработаны методики...», «Построена... модель...»; стр. 144 «Разработана методика...»). Имеются опечатки в тексте (стр. 174 «3. На основании проведенных исследований рекомендовано восстановить жесткостную диссиметрию сателлитного узла в плоскости его продольного сечения, вызванную несимметричностью конструкции, путем корректировки геометрии оси сателлита»). В действительности из текста диссертации следует, что жесткостную диссиметрию необходимо устранить. Имеются тривиальные (стр. 175 «5. Рекомендовано продолжить поиск выравнивания нагрузки по сателлитам») и декларативные рекомендации («6. Рекомендовано увеличить жесткость щек водила»). На самом деле в диссертации имеются обоснованные и конкретно сформулированные выводы, но они разбросаны по тексту (стр. 35, 47, 138 и ряд других), что в значительной степени затрудняет оценку работы.

6. При формировании математических моделей элементов ГТЗА отсутствует предварительный анализ влияния отдельных факторов и физических процессов для принятия обоснованных допущений

7. Утверждение на стр. 117 «В качестве точных, при анализе принимались значения, к которым стремятся результаты при измельчении конечно-элементной сетки» требует более строгого обоснования.

8. Имеется ряд редакторских замечаний.

В ряде случаев автор без объяснения использует новые неопределенные термины: «алгоритмический инструментарий» (стр. 5), «динамическое демпфирование» (стр. 11), «кинематическая часть» (стр. 95).

Имеются ошибки при использовании терминов, относящихся к планетарной передаче. Первая ступень редуктора (рис. 1.2) не является планетарной. Это многозвенный зубчатый механизм с неподвижными осями (Артоболовский И.И. Теория механизмов и машин, М.: Наука, 1988. Стр. 493) в многопоточном исполнении (Сидоров П.Г. и др. Многопоточные зубчатые трансмиссии: Теория и методология проектирования, М.: Машиностроение, 2011. 339 с.), поэтому использование здесь терминов «сателлит» и «водило» неправомерно.

Не совсем удачно расположена структурная схема редуктора и выполнена нумерация звеньев на рис. 1.2. Вход редуктора следовало разметить слева, а выход – справа. Нумерация звеньев в структурных схемах обычно выполняется от входа к выходу.

Во всех формулах автор использует * (звездочку) вместо общепринятого знака умножения.

Имеются неполные библиографические описания (№ 207, 211, 240, 251, 273 и др.).

6. Заключение о соответствии диссертации критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

6.1. Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой, на основании предложенных автором математических моделей главного турбозубчатого агрегата и его элементов, разработанной методологии проектирования и результатов исследования динамики рассматриваемого агрегата решена научная проблема снижения уровня вибраций силовых корабельных установок и связанного с этим улучшения виброшумовых параметров кораблей, имеющая важное социально-экономическое значение («Положение о порядке присуждения ученых степеней», п. 9).

6.2. Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвинутые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку. В диссертации приводятся сведения о практическом использовании полученных автором диссертации научных результатов. («Положение...», п. 10).

6.3. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 18 рецензируемых научных изданиях, входящих в «Перечень рецензируемых научных изданий...», 13 других журналах и изданиях, 19 сборниках научных конференций и одной монографии. На разработанное автором программное обеспечение получено свидетельство о государственной регистрации («Положение...», п. 11, 13)..

6.4. В диссертации приведены необходимые ссылки на авторов и источники заимствования материалов или отдельных результатов («Положение...», п. 14).

Принимая во внимание вышеизложенное, достоинства и отмеченные недостатки диссертации, считаю, что диссертационная работа Насонова Дмитрия Александровича «Методология расчета и динамический анализ турбозубчатых агрегатов главного привода судовых гребных винтов», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры соответствует критериям, предъявляемым к докторским диссертациям, установленным действующим Положением о порядке присуждения ученых степеней» (п.п. 9, 10, 11, 13, 14), а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры.

Официальный оппонент,
доктор технических наук (05.02.09, 05.02.18),
профессор, профессор кафедры
«Проектирование механизмов и деталей машин»
ФБГОУ ВО «Тулский государственный университет»

В.А. Крюков

30.09.2016 г.

Телефон: 8-(4872)-25-46-39.

Электронная почта: pmdm@tsu.tula.ru

