

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Болотова Михаила Александровича "РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ГТД ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИХ ПРОИЗВОДСТВА", представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.15 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

Работа Болотова М.А. посвящена улучшению эксплуатационных характеристик газотурбинных двигателей. При этом основная задача, решаемая диссертантом, – обеспечение геометрической точности сборочных параметров узлов. Эти параметры задаются техническими требованиями на сборку роторов в конструкторской документации, однако они не всегда достижимы при первой сборке. Переборки ведут к росту временных затрат при производстве и ремонте двигателей, увеличению общей трудоёмкости сборочных работ.

Кроме того, повышение точности деталей и сборок напрямую связано с требованиями к жесткости конструкции, значению неуравновешенных сил роторов, уровню роторных вибраций и, наконец, что очень важно, с требованием к стабильности вибрационных характеристик двигателя в эксплуатации. Улучшаются и газодинамические параметры двигателя.

С этих позиций разработка методик обеспечения и оптимизации геометрической точности деталей и сборок, для достижения заложенных в конструкторскую документацию требований, с учетом современных возможностей существующего инструментария и технологий, поставленная диссертантом общая задача является своевременной и весьма актуальной. Кратко остановимся на содержании работы и замечаниях по разделам.

В введении приведены основные позиции, обычно представляемые и в авторефератах к диссертационным работам. При кратком обосновании актуальности работы автор делает акцент на применение точных геометрических моделей деталей ГТД и их заготовок. Отмечается, что повышение производительности и точности технологических процессов изготовления деталей ГТД может быть достигнуто за счёт управления параметрами размерной обработки заготовок с использованием цифровых моделей процессов. Повышение геометрической точности узлов можно обеспечить за счёт сборки с оптимизированным вариантом взаимного положения комплектующих деталей, определённого компьютерным анализом возможных вариантов их ориентации в узле. С учетом сказанного и ряда других положений автор формирует и обосновывает цель работы.

Предметами исследования в работе автор обозначил размерные связи в технологических процессах сборки узлов, координатные измерения, обработку и анализ геометрических данных, неуравновешенность роторов. Несмотря на то, что область применения методик диссертанта, представленных в работе, ограничена этапом производства сборки роторов, работа строится на методиках и решениях, объединяющих работу по трем отдельным направлениям - метрологию, технологию производства и конструкцию двигателей.

Последнее направление напрямую связано с необходимостью решения таких задач, как снижение уровня вибраций через уравнивание роторов, обеспечение необходимых натягов и зазоров при сборке узлов и т.д.

Среди замечаний по введению можно отметить следующие

Стр. 8 Автор говорит, что "разработка технологических процессов производства ГТД выполняется без учёта в них реальной геометрии деталей и контактного взаимодействия их поверхностей в собранном узле. *Утверждение не совсем верно. Существует технология селективной сборки уже изготовленных узлов достаточно хорошо описана и рассмотрена. Также описаны и опробованы методы окончательной обработки деталей после сборки узлов. Автор сам приводит в обзорной главе ссылки на публикации, где эти вопросы рассматриваются достаточно подробно.*

Стр. 8. “Технологические процессы сборки роторов ГТД разрабатываются без учёта взаимного влияния положения каждой деталей на уровень вибраций ротора”.

Это не делается не из-за отсутствия теоретической основы или методики, а ввиду высокой трудоемкости, связанной с точным измерением эксцентриситетов посадочных поверхностей всех деталей.

Стр. 9. Научная новизна... Разработан метод снижения неуравновешенностей роторов ГТД с помощью балансировки на цифровой модели, отличающийся от существующих методов способом расчёта их оптимального положения в окружном направлении за счёт обеспечения противонаправленности возмущающих воздействий от неуравновешенностей деталей и сборочных единиц

Отмечается, что разработан новый метод балансировки. Хотя в формулировке отличия указан известный метод балансировки подбором углового положения деталей (направление остаточного дисбаланса одной ступени смещают, например, на 180 градусов против дисбаланса соседней ступени). Не совсем понятно, как согласуются определения противонаправленности возбуждающих воздействий и оптимальной окружной ориентации. Это не одно и то же?

В первой главе (обзорной) в общем виде обозначаются современные технологии повышения технических показателей узлов ГТД и формулируется производственная проблема, которая и решается автором в диссертационной работе - обеспечение предельного уровня вибрации авиационных газотурбинных двигателей.

Отмечается, что основной причиной повышенной вибрации в компрессорах и турбинах является дисбаланс составляющих узлов и деталей. Приводится статистика, показывающая, что технологические причины повышенных дисбалансов проявляются в наибольшей степени по сравнению с другими.

В своем детальном обзоре автор связывает такую ситуацию с существующими проблемами точности измерений геометрии деталей и узлов, с другой стороны, им отмечается и множественность причин возникновения дисбалансов.

Приводится обзор работ, посвященных изучению проблемы снижения вибраций роторных машин, приводится обзор существующих направлений в математическом моделировании роторных вибраций, приводится их оценка.

На основании проведенного обзора направлений решения поставленной задачи автор обосновывает необходимость применения цифровых моделей, позволяющих оценивать параметры точности изделий, корректировать отклонения деталей и узлов в процессе их производства. Отмечается, что применение инновационных технологий и цифровых двойников авиационных двигателей в ходе их сборки для определения ключевых выходных параметров до выполнения испытаний изделий позволят выявлять ошибки на ранних этапах производства, что существенно снизит производственные затраты.

На основании проведенного обзора автор ставит цель диссертационной работы (Повышение технических показателей производства ГТД...) и задачи, которые необходимо решить для ее достижения.

Среди замечаний и вопросов к первой главе можно отметить следующие

Стр. 23. В качестве учитываемых в блоке 5а (ВКИМ) факторов могут выступать неопределённости, вносимые датчиками, кинематической системой измерительных машин, внешней средой и другими. *Что в итоге – общая неопределённость (погрешность измерения) или можно выделить конкретные неопределённости и их вклад в общую погрешность измерения? Можно ли считать, что основная часть связана с погрешностями формы?*

Стр. 45. “Нарушение натягов в соединениях деталей из-за возможных градиентов температур и действующих силовых факторов приводит к появлению дисбалансов”. *Неточность. Нарушение (снижение) натягов не приводит к значительной расцентровке,*

в первую очередь меняется жесткостная характеристика соединения, и приводит не к возникновению дисбалансов, а к их изменению и перераспределению в работе с учетом изменения форм вынужденных колебаний (прогибов от дисбалансов).

Стр. 48. *Ссылка на работу [153] ... и ряд последующих – очень неточное и неаккуратное описание содержания статей...*

Стр. 48-49. Приведенные выше и множество других работ обозначают научные подходы к изучению вибрационного состояния изделий на основе использования математических моделей. *Ссылки в разделе 1.5 не отражают сегодняшнее состояние в моделировании и анализе роторных систем ГТД расчётными методами, тем более научные подходы. При этом автор ссылается только на работы зарубежных авторов. Отсутствуют ссылки на работы российских ученых, внесших свой вклад в моделирование динамических систем ГТД, работы сегодняшнего дня от авторитетных источников.*

Стр. 50. “Несбалансированность ротора приводит к возникновению сил реакции в муфте, что часто является основной причиной вибрации в машинах”. *Непонятная фраза... Почему реакции в муфтах являются основной причиной? Реакции в муфтах возникают только при перекосах и наличия ортотропии их жесткостных свойств, несинхронного возбуждения... Перекос – это дисбаланс.*

Стр. 50. “Аналитический обзор упомянутых работ показывает возможности современных математических моделей, основанных на методе конечных элементов, для оценки уровня дисбалансов и вибраций роторов машин, в том числе гибких”. *Автору следовало бы уточнить цель такого обзора в соответствии с поставленной основной задачей – снижение неуравновешенностей ротора. Снижение вибраций двигателя достигается не только уменьшением дисбалансов.*

Стр. 51. Исходными данными для построения таких моделей оценки дисбалансов и уровня вибраций авиационных двигателей могут являться погрешности геометрических параметров деталей и узлов, а также уровни их неуравновешенностей. *Вообще-то через погрешности определяются неуравновешенности. В настоящее время в существующих программах в модели всегда закладываются дисбалансы и их распределение, а не погрешности формы. Возможно идея начинать с погрешностей и неплоха, но на сегодняшний день она не реализована ни в одной из программ роторной динамики*

Стр. 52 Определение оптимального или рационального сочетания параметров (детали и сборки) требует разработки двух классов моделей. Первый класс моделей должен позволять оценивать точность сборочных параметров узлов при заданной геометрии деталей. Второй класс модели должен описывать взаимосвязь между параметрами точности деталей и узлов и затратами на их изготовление или сборку. *Как решались вторая задача в работе?*

Стр. 59. Выводы, пункт 3. Проведен анализ статистических данных по возникновению повышенных вибраций серийно производимого изделия «НК». Рассмотрены причины возникновения повышенных вибраций рассматриваемого изделия и сформированы возможные мероприятия, направленные на снижение уровня вибраций роторов.... *В первой главе нет материалов, касающихся этого пункта выводов. Ссылка на Приложения (акт внедрения) находится во Введении. Причины возникновения повышенных вибраций рассматриваемого изделия – в разделе 4.4.*

Стр. 60-61. Выводы, пункт 7. Аналитический обзор показал возможности современных математических моделей, основанных на методе конечных элементов, для оценки уровня дисбалансов и вибраций роторов машин, в том числе гибких. *С учетом предыдущих замечаний пункт 7 следовало бы опустить.*

Во второй главе автор вводит понятие действительных моделей или цифровую модель сборочных единиц и/или производственных процессов технических объектов. Отмечается, что действительная модель объекта, отражающая его геометрические параметры, может быть получена на основе измерений и обработки их результатов. Автор формирует основные принципы создания и использования таких моделей, связывает их с необходимостью решения различных задач проектирования машин и их производства.

Для оценки взаимосвязи конструкторских и технологических этапов производства двигателей и особенностями цифровизации этих этапов диссертант рассматривает многоуровневую структурную схему с описанием технологических задач для всех её уровней, выделяет 16 цифровых моделей, необходимых для их решения.

В дальнейших подразделах автор делает акцент на создание действительных моделей поверхностей деталей и узлов, предлагает методику их создания на основе измерительной информации. Вводятся понятия “Виртуальная мера” и “Виртуальная комплектная сборка”. Показано, что эти технологии позволяют установить связь отклонений форм отдельных деталей с сборочными параметрами. Показана эффективность ВМ и ВКС.

Весьма важным является то, что предлагаемая методика направлена и на повышение точности измерений и описания геометрических поверхностей с учётом формирования размерных связей в составе сборочных единиц.

Среди замечаний и вопросов к главе следующие

Стр. 66. Рис. 2.1 Структурно-функциональная диаграмма.... *На ее основе автор выделяет технологические задачи, которые должны быть реализованы посредством цифровых моделей (16 моделей). В приложении Б приводится диаграмма IDEF0 «Прогнозирование и обеспечение показателей качества ГТД с использованием действительных моделей деталей и узлов». Вопрос – степень программной реализации 16-ти цифровых моделей в этом общем процессе. Как автоматизирован этот процесс?*

Стр. 69. Аббревиатура ПКИ (показатель качества изделия). *Слишком общее понятие. Многообразие задач, где используются цифровые модели, определяет и многообразие ПКИ. Учитывая, что основные задачи в диссертации связаны с балансировкой было бы лучше и оставаться в области вибраций. Например, связать ПКИ с уровнем допустимых значений дисбалансов из ТУ на балансировку или из КД.*

Стр. 73 Методика создания действительных моделей включает в себя шесть этапов и представлена в виде блок-схемы (рисунок 2.2). *Как реализована эта методика автором – в виде отдельных этапов со своим программным обеспечением, либо с некоторой автоматизацией передачи данных и принятия решений? Трудоемкость этих этапов?*

Стр. 81. Предлагаемый метод получения действительных размеров ДСЕ и их сборочных параметров учитывает функциональные и конструкторские особенности измеряемых изделий. ... Обработка измеренных данных предполагает воспроизведение функциональных и/или размерных связей, возникающих в изделиях при сборке деталей. *Какова может быть размерность модели (задачи) с учетом количества сопрягаемых деталей и размерных цепочек...*

Стр. 91. Использование разработанных моделей и алгоритмов позволит создать новые методы и модели обработки измеренных данных... *Какова их реализация на сегодняшний день? Уровень внедрения на двигателестроительные предприятия?*

Стр. 115. исследовано 1200 деталей. *Хотелось бы увидеть всю номенклатуру деталей выбранных для исследования погрешностей. Каким образом собиралась*

производственная статистика по геометрическим отклонениям деталей. И сколько времени понадобилось для набора 1200 массивов точек?

Стр. 123. Выводы.... *И в качестве общего замечания – в главе отсутствуют четкая информация о том какие методики реализованы в виде алгоритмов и программных модулей, и которые можно уже использовать в практических работах предприятий. Хотя в автореферате отмечено, что в главе “описаны разработанные средства для автоматизации этапов создания действительных моделей деталей и технологических объектов”.*

В третьей главе рассматриваются “вопросы прогнозирования и обеспечения геометрической точности сборочных параметров технологических систем и узлов изделий”.

Автором отмечается, что сложная топология геометрических отклонений, включающая отклонения формы и расположения поверхностей деталей, требует разработки эффективного метода и комплекса специальных моделей сопряжения деталей. Метод, предлагаемый автором, реализуется в процессе выполнения девяти этапов (задач), за каждым из которых должна стоять цифровая модель, реализованная в программных модулях, в том числе, решающих задачу о замыкающих звеньях размерных цепочек. Приводится описание всего комплекса моделей.

В главе также рассматриваются математические алгоритмы сопряжения поверхностей деталей в двух постановках – для жестких деталей и деформируемых. В Приложениях к главе представлены экспериментальные результаты применения методик к сопрягаемым деталям в сборках.

Действительные модели деталей предлагается также использовать и для повышения точности сборки узлов за счет автоматизации пригонки деталей, коррекции формы заготовок. Необходимо отметить, что практически все конкретные методики с использованием действительных моделей автор делит на этапы, этапы на подэтапы или задачи, позволяющие достаточно просто решать задачу их программной реализации, что несомненно несет за собой положительный эффект.

Среди замечаний и вопросов следующие

Стр. 131. “Формализованная постановка задачи сборки деталей...” Каждому подмножеству контактных поверхностей соответствует группа состояний. *Оценка только одной сборки даже по одному показателю качества требует больших трудозатрат и времени уже не технологов, а прочнистов и конструкторов. Для решения этих задач требуется соответствующая матчасть или в виртуальном поле исследований требуются высокоточные модели, уже имеющиеся на предприятиях. Поэтому такая постановка задачи в практической области должна заканчиваться значениями дисбалансов и их распределением.*

Стр. 141. “Результатом выполнения названных этапов является оценка состояния системы, при которой достигается оптимальный вариант сборки по рассматриваемому значению зазора.” *Здесь возникает вопрос – наилучшее совмещение поверхностей, обеспечивающее полное прилегание за счет перемещения или поворота, не может ли привести к перекосам сопрягаемых деталей. И как в таком случае решается комплексная задача?*

Стр. 153. Рисунок 3.15 – Блок-схема обобщенной методики цифровой коррекции. *Как этот метод был реализован и были ли проведены работы и рекомендации для конкретныхборок.*

В четвертой главе рассматриваются вопросы применения действительных моделей деталей и узлов на экспериментальном демонстраторе, а также моделях турбины и компрессора реального двигателя. Конечной целью является снижение неуравновешенностей роторов ГТД с использованием разработанных методов и алгоритмов.

Основная идея, которую реализует диссертант в этом разделе, заключается в определении взаимных угловых положений деталей, при которых обеспечивается противонаправленность возбуждающего воздействия от их неуравновешенностей и определении величин корректировочных масс.

Среди замечаний и вопросов следующие

Стр. 194. Разработана конечно-элементная модель турбины низкого давления, позволяющая определять уровень вибраций на опорах ГТД при учёте неуравновешенностей.

Как создавалась модель ротора - на упругих опорах?

Какие жесткости и какое демпфирование? Расположение опор в модели не показано.

Следует иметь ввиду, что разброс этих величин в реальном двигателе может быть очень существенен и зависеть от режимов работы двигателя. То есть количественная оценка очень сложна (требуется полная модель роторной системы и возможно со статорной частью опорных узлов вплоть до подвески). А для качественной оценки (подбор углового положения рабочих колес) достаточно ограничиться линейной моделью ротора на изотропных опорах. Не стоит усложнять модель анизотропией жесткости опор, которая даже для подшипников может достигать больших значений.

Стр. 199. Рис. 4.25. Результаты исследований показывают, что выбор рационального углового положения (рабочих колес) позволяет уменьшить уровень вибраций на опорах ГТД на 25%. *Не показано как получено это число. Как в реальности и кем будут проводиться такие вычисления с учетом того, что у каждого собранного ротора действительные модели их составляющих деталей/узлов дадут различные значения и распределение дисбалансов*

Стр. 343. Приложение Ж5 к главе 4. Таблица Ж.5 Параметры изменения параметров... Полученные данные использовались для верификации конечно-элементной модели имитатора ротора. *Непонятно в чем заключалась верификация МКЭ модели. Верификация по критикам? Значение и расстановка дисбалансов? МКЭ модели из отдельных деталей обычно требуют проверки в местах контактирующих поверхностей, их перекосам, характеристикам материалов...*

Стр. 350. Задачей апробации являлась проверка комплекса разработанных моделей, позволяющих оценивать уровни вибраций роторов в зависимости от погрешностей сборки узла и неуравновешенности деталей.

Замечания по тексту - в осесимметричной модели на постоянном режиме прогиб ротора статический и постоянный. В эксперименте датчиками фиксируется не прогиб ротора, а перемещения вследствие его прецессии (орбита). Если проверялась модель по экспериментальным данным, то погрешность 27 % по частоте на такой простой конструкции слишком велика. Возможно, это связано уже с конструктивными особенностями балансировочного стенда, на котором установлен имитатор, неточностью в оценке реальной жесткости подшипников и т.д.

В главе 5 представлены результаты реализации разработанных автором методов, алгоритмов и программных средств на примере реальной конструкции трехступенчатого компрессора низкого давления. Решается задача минимизации радиальных и торцевых отклонений деталей от номинальных. Показано, что для выбранных критериев качества применение авторских методик может привести к существенному снижению величин дисбалансов и снизить геометрические отклонения сборочных параметров.

Представлена также инженерная методика, которая может быть автоматизирована и использована уже в производственном процессе для подготовки технологических решений с использованием предварительных цифровых моделей (у автора действительных моделей) отдельных деталей в разумных временных рамках.

Показана и экономическая выгода от применения разработанных методик.

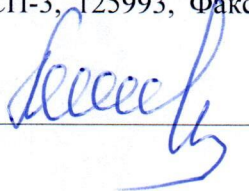
Замечания к главе

Стр. 211. В качестве рабочих и эксплуатационных параметров могут выступать такие параметры как суммарный дисбаланс, виброскорости на опорах, ожидаемые перемещения ротора в различных сечениях (в случае гибкого ротора), реакции сил на опорах ротора. *Очень формализованная постановка для выбора критерия. Использование осесимметричной модели ротора даст только предварительную оценку. Реализация этой задачи в динамике требует использования высокоточных моделей роторных систем. Лучше оставаться на статических показателях качества – радиальные и торцовые биения, проходные сечения, зазоры в лабиринтах и натяги, значения дисбалансов. Дополнительным показателем качества сборки может явиться ее соответствие распределению дисбалансов и их значениям, которые задаются конструктором или определяются прочностью по динамическим коэффициентам податливости (ДКВ) с использованием полноценных моделей.*

Замечания, приведенные в отзыве, не снижают общей ценности диссертационной работы. Результаты работы могут быть рекомендованы к использованию в подразделениях предприятий, ведущих проектирование и производство газотурбинных двигателей. Можно сказать, что данная работа является еще одним шагом к решению крупной научно-технической проблемы, что, собственно, и закладывается в требования к докторским диссертациям.

Работа является законченным трудом, соответствует требованиям Положения ВАК к диссертационным работам. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации. Список из 54 работ, опубликованных на протяжении длительного периода деятельности диссертанта, полностью отвечает содержанию диссертации и реферата, и говорит о высокой квалификации диссертанта. Болотов М.А. заслуживает присвоения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.15 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов".

Доктор технических наук, профессор кафедры "Конструкция и проектирование двигателей" Московского авиационного института (МАИ), Почтовый адрес: Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Факс: +7 499 158-29-77. Электронная почта: mai@mai.ru.



Леонтьев Михаил Константинович

29 августа 2024 г.

Подпись Леонтьева Михаила Константиновича заверяю

И. о. проректора по инновационной деятельности



Равикович Юрий Александрович