

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и стратегическим коммуникациям
ФГБОУ ВО «МГТУ имени Н.Э. Баумана»
(национальный исследовательский университет)



2022 г.

О Т З Ы В

ведущей организации на диссертацию Тараторкина Александра Игоревича
«Научные методы снижения динамической и вибраакустической
нагруженности силовых передач колёсных и гусеничных машин путём
вариации модальных свойств», представленной на соискание ученой степени
доктора технических наук по специальности 05.05.03 – «Колесные и
гусеничные машины»

1. Актуальность темы исследования

Существующие методы решения задач снижения динамической и вибраакустической нагруженности силовых передач перспективных колёсных и гусеничных машин свидетельствуют об общности подходов, базирующихся на определении частотных и демпфирующих свойств. При исследовании силовых передач, как правило, разрабатываются модели с сосредоточенными массами и ограниченным числом степеней свободы. При этом характеристики, определяющими возможность формирования высокой динамической нагруженности и возбуждения резонансов, являются собственные частоты, формы колебаний и коэффициенты демпфирования, т.е. модальные характеристики системы. В то же время, если конструкция содержит длинные валы, диски, мембранны и др., удовлетворительные результаты могут быть получены только при комбинированном рассмотрении динамической системы, когда основная модель является прежней, а перечисленные выше элементы рассматриваются как тела с распределённой массой, обладающие набором собственных модальных характеристик. Одновременно с этим, при исследовании вибраакустической нагруженности картерных деталей силовых передач перспективных колёсных и гусеничных машин на основе современного математического и программно-аппаратного обеспечения (CAD-CAE пакетов)

узлы и агрегаты рассматриваются с точки зрения формирования структурных вибраций исключительно как системы с распределённой массой. Основными характеристиками данных систем являются модальные характеристики.

Приведённое выше определяет общность алгоритмов решения задач снижения динамической и виброакустической нагруженности силовых передач на основе модального представления систем. Данный подход в настоящее время основан на применении математического аппарата для решения линейных задач. При этом существующие методики, используемое программное и аппаратное обеспечение не позволяют в должной мере учитывать проявление многих нелинейных эффектов, возникающих в современных силовых передачах колесных и гусеничных машин и ограничивающих уровень комфорта. Таким образом, диссертационная работа Тараторкина А.И., направленная на решение научной проблемы обеспечение необходимого уровня динамической и виброакустической нагруженности силовых передач колёсных и гусеничных машин на основе совершенствования модальных свойств является **актуальной**.

2. Научная новизна положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Автором на защиту выносятся основные результаты и выводы, а также положения научной новизны и практической значимости диссертационного исследования. Научная новизна диссертационного исследования заключается:

– в разработке нового расчётно-экспериментального метода решения научной проблемы снижения динамической и виброакустической нагруженности силовых передач колёсных и гусеничных машин, отличающегося применением алгоритмов структурно-динамического анализа для научно обоснованной вариации модальных свойств сложных механических систем с использованием современных средств CAD-CAE;

– в разработке новых моделей исследуемых мехатронных трансмиссионных систем, учитывающих переменность структуры и нелинейность свойств объектов исследования на установившихся и переходных режимах работы с учётом «конфликтов задач», возникающих при совместной реализации алгоритмов управления структурными составляющими силовых передач колёсных и гусеничных машин;

– в установлении новых закономерностей формирования динамической нагруженности в элементах управления (фрикционных дисках) трансмиссий, отличающихся учётом малоизученных эффектов возбуждения

параметрических резонансов и термоупругой неустойчивости (патент РФ на изобретение № 2728584), а также вариацией объёма рабочей жидкости в компенсационной камере бустера управления;

– в разработке метода перераспределения силового противофазного управляющего воздействия (при возбуждении низкочастотных энергоёмких колебаний на собственной частоте системы при управлении переключением передач после окончания фазы выравнивания скоростей, ведущих и ведомых элементов – эффект «Бонанца»), отличающегося учётом и идентификацией начальной фазы колебаний, определяемой по значениям сигнатур первой и второй производных крутящего момента (патент РФ на изобретение № 2735455);

– в обосновании алгоритмов стабилизации колебательных процессов в силовых передачах колёсных и гусеничных машин, отличающихся определением места установки и параметров гасителя крутильных колебаний с учётом возникновения суб- и супергармонических возмущений, а также возможности возникновения «конфликта задач» при реализации алгоритмов управления тепловым двигателем, электромашиной и трансмиссией;

– в разработке новых математических моделей и в обосновании технических решений по снижению динамической нагруженности силовой передачи привода водомётных движителей амфибийных машин, усовершенствованной методики проектировочного расчёта системы «двигатель – трансмиссия – водомётный двигатель – машина», отличающихся учётом кинематических, силовых, периодически изменяемых свойств системы, возбуждающих резонансные параметрические колебания, а также учётом нелинейных характеристик соединений опор углового редуктора силовой передачи;

– в разработке алгоритма структурно-динамического моделирования для обеспечения требуемого уровня вибрационных параметров силовых передач колёсных и гусеничных машин с использованием современных инструментов CAD-CAE систем на этапе создания виртуального образца (цифровой модели), отличающегося комплексом новых модальных моделей и методик по их верификации для исследуемых систем, использованием обоснованного перечня силовых факторов и средств САЕ для их определения и предложенной последовательностью определения путей распространения вибраций и идентификации уровня акустического давления в заданной области пространства с учётом вклада отдельных форм колебаний в интегральный уровень вибрационного излучения;

– в результатах исследований новых малоизученных явлений

возникновения высокочастотного полигармонического возбуждения с существенной амплитудой, формируемого в гидравлических и механических системах (кавитационными процессами в полостях масляных насосов и боковыми зазорами в зубчатых зацеплениях редукторов и др.).

– в обосновании требований к составу комплексов информационно-измерительного оборудования, программно-аппаратных средств, испытательным стендам, методикам проведения модальных испытаний и интерпретации их результатов, к верификации модальных моделей. В рамках разработанных методов снижения динамической и вибраакустической нагруженности совершенствованием модальных свойств трансмиссионных систем автором успешно решены поставленные задачи при стендовых и ходовых испытаниях. При этом новизна отдельных технических решений и подхода в целом подтверждена рядом патентов на изобретения как для решения, низко- так и высокочастотных задач (патенты РФ на изобретения RU 2581891, RU 157159).

3. Значимость результатов работы для науки и производства

Результаты, полученные автором, расширяют научное знание в области расчета и проектирования силовых передач колесных и гусеничных машин и позволяют решать теоретические и прикладные задачи по совершенствованию колесных и гусеничных машин.

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в развитии методов проектирования колёсных и гусеничных машин в части, касающейся обоснования и разработки методов обеспечения требуемого уровня динамической и вибраакустической нагруженности силовых передач колёсных и гусеничных машин на основе модального представления исследуемых систем.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в повышении достоверности прогнозирования динамической и вибраакустической нагруженности силовых передач колёсных и гусеничных машин на этапе проектирования:

– разработан и предложен метод модального представления динамических систем с использованием современного программного обеспечения, что позволяет обосновать возможность и целесообразность использования имитационных моделей различной степени сложности;

– представлены рекомендации по совершенствованию (синтезу гасителей колебаний и алгоритмов управления) динамических и вибраакустических

характеристик опытных образцов трансмиссий машин, реализованные на практике. Полученные результаты и выводы в области исследования и проектирования виброзащитных систем использованы в процессе создания конструкций новых и модернизации существующих силовых передач колёсных и гусеничных машин (перспективных БГМ, АГМ, специальных колёсных шасси (СКШ), автомобилей категорий М1, Н2 и Н3).

Материалы диссертации могут быть использованы в научно-исследовательских и проектно-конструкторских организациях, занимающихся проектированием колесных и гусеничных машин, а также в учебном процессе высших учебных заведений.

4. Обоснованность и достоверность результатов работы

Достоверность научных результатов работы подтверждается корректностью постановки задач и применяемых методов теории нелинейных колебаний, изложенных в фундаментальных трудах отечественных и зарубежных учёных. При решении поставленных задач эффективно используются методы системного анализа, методы теории управления, а также результаты имитационного моделирования на ЭВМ и экспериментальных исследований.

Научные положения выводы и рекомендации, представленные в диссертации, обоснованы и подтверждены сопоставлением результатов расчёта с данными экспериментальных исследований.

5. Структура и содержание работы

Диссертация Тараторкина А.И. состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов по работе (заключение), списка литературы из 137 наименований. Работа содержит 371 страницу машинописного текста, включая 195 рисунков, 43 таблицы, акты внедрения, приведенные в приложении. Соискателем сформулированы выводы после каждой из пяти глав, в заключении перечислены результаты всей работы.

В введении обоснована актуальность работы, поставлена цель и задачи исследования, излагается предложенный подход решения проблемы, сформулированы научная новизна и практическая ценность результатов, приведены выносимые на защиту положения.

В главе 1 «Состояние вопроса, обоснование задач исследования и предлагаемые подходы их решения» проведён анализ состояния проблемы, выполненный на основе обзора отечественных и зарубежных литературных

источников, в которых приводятся результаты исследований, направленных на разработку методов прогнозирования, снижения динамической и виброакустической нагруженности силовых передач колёсных и гусеничных машин. Обоснована целесообразность создания единого метода к решению данной проблемы на основе модального представления систем и совершенствования их модальных свойств в широком диапазоне частот. Установлено, что в отличии от известных ранее, в перспективных конструкциях силовых передачах колесных и гусеничных машин необходимо учитывать новые эффекты, вызванные нелинейностью упруго-инерционных характеристик механических систем и сложных мехатронных систем управления. Выполненные в первой главе исследования позволили сформулировать задачи, направленные на достижение цели работы, решению которых посвящены остальные главы диссертации.

В главе 2 «Теоретическое обоснование путей снижения динамической и виброакустической нагруженности трансмиссий на установившихся и переходных режимах» излагаются теоретические основы разрабатываемого метода. Суть метода заключается в определении модальных параметров (собственных частот и форм колебаний, коэффициентов демпфирования и др.) на основе знания частотных характеристик, вычисляемых либо расчётом с использованием матриц распределения масс, жёсткости и демпфирования, либо по результатам определения частотных характеристик по отношению между параметрами реакции и входного воздействия как функции частоты при экспериментальном исследовании. Учитывая применимость данного подхода лишь для линейных систем, автор дополняет его учётом возмущений, возникающих вследствие проявления нелинейных свойств динамических систем. В этой связи подробно рассматриваются свойства масляных насосов системы управления трансмиссией при вспенивании рабочей жидкости, нелинейная жёсткость в контакте фрикционных дисков и сопрягаемых с ними барабанов, а также в зацеплении эвольвентных поверхностей зубьев колёс и т.д. В данной главе, выполняется оценка устойчивости исследуемых динамических процессов.

В главе 3 «Совершенствование параметров динамической нагруженности силовых передач колёсных и гусеничных машин» автор приводит примеры реализации разработанного метода для прогнозирования динамической нагруженности в области низких частот силовых передач, модернизируемых и вновь разрабатываемых колёсных и гусеничных машин на

установившихся и переходных режимах работы. Приводятся результаты расчетно-экспериментального исследования и обоснованные технические решения по снижению динамической нагруженности силовой передачи привода водомётных движителей амфибийной машины при возбуждении резонансных параметрических колебаний. Разрабатывается и подробно излагается метод перераспределения силового противофазного управляющего воздействия при возбуждении низкочастотных энергоёмких колебаний при управлении переключением передач. Кроме того, в данной главе приводятся результаты исследований мехатронных систем с учетом эффекта «конфликта задач», возникающего при совместной реализации алгоритмов управления элементами энергосиловых блоков. Приводятся модели, устанавливаются и анализируются новые закономерности формирования динамической нагруженности фрикционных дисков трансмиссий, отличающихся учётом малоизученных эффектов возбуждения термоупругой неустойчивости и параметрических резонансов.

В главе 4 «Прогнозирование и снижение параметров вибраакустической нагруженности силовых передач колёсных и гусеничных машин» содержится описание и излагаются результаты реализации предлагаемого метода прогнозирования и снижения вибраакустической нагруженности силовых передач транспортных машин на основе разработанного метода модального представления динамических систем – структурно-динамического анализа сложных механических систем и совершенствования их модальных свойств с использованием современных инструментов CAD-CAE систем. Приводятся обоснованные технические решения по снижению вибраакустической нагруженности объектов исследования - вально-планетарной АКП автомобилей категории N2, N3 и девятиступенчатой планетарной АКП автомобиля категории M1.

В главе 5 «Программно-аппаратное обеспечение экспериментальных исследований динамической и вибраакустической нагруженности силовых передач колёсных и гусеничных машин» диссертации формулируются цели и задачи экспериментального исследования динамической и вибраакустической нагруженности силовых передач колёсных и гусеничных машин для реализации метода модального представления, обосновывается перечень необходимого испытательного оборудования, информационно-измерительного и программного обеспечения для обработки результатов ходовых и стендовых испытаний. Приводится последовательность и алгоритмы экспериментального

определения параметров исследуемых динамических систем, исследуемых динамических и вибраакустических процессов (частотные характеристики). Приводится интерпретация результатов экспериментальных исследований, оценка модальных параметров и верификация модальных моделей.

6. Основные замечания по содержанию диссертации и автореферата

1. На стр. 76 и 85 диссертации представлены реализации имитационных моделей трансмиссии автомобиля для оценки ее динамической нагруженности, причем крутильная масса с моментом инерции, соответствующим приведенной к ведущим колесам массе автомобиля, является «свободной», то есть не нагружена внешним вращающим моментом. В связи с этим неясно, как автор оценивает динамическую нагруженность, если он не учитывает момент сопротивления движению, который, как раз, и позволяет нагрузить детали трансмиссии. Амплитуды ускорений вращающихся масс при отсутствии момента сопротивления будут сильно отличаться от амплитуд при его наличии.

2. На стр. 79 (рис. 3.25) дано частотное представление ускорений на 3-й передаче для различных крутильных масс трансмиссии, включая приведенную к колесам массу автомобиля. Спектр ускорений для массы автомобиля имеет качественное различие по полосам частот с остальными крутильными массами. В частности, наблюдаются амплитуды ускорений при частотах, отсутствующих на массе маховика (и, по-видимому, не заданных в модели ДВС). В тексте диссертации факт изменения спектра возмущающего воздействия никак не объяснен.

3. На стр. 352 в п. 4 общих выводов по работе написано, что «решена задача снижения динамической нагруженности силового блока перспективной БГМ...при выполнении конструкции гасителя крутильных колебаний в виде упругого торсионного вала». Однако далее написано, что «установлено, что такое решение может иметь ограниченное применение при использовании с высокомоментными современными двигателями в случае возникновения так называемого эффекта «конфликта задач». Вместе с тем, именно перспективные быстроходные гусеничные и колесные машины оснащаются силовыми установками, обеспечивающими высокие показатели энергооруженности, в связи с чем остается неясным, можно ли считать задачу снижения динамической нагруженности силового блока перспективной БГМ решенной при установке в качестве гасителя упругого вала, если автор далее пишет о нерациональности данного решения.

4. На стр. 353 в п. 5 общих выводов по работе написано, что «на основе разработанного метода...был обоснован выбор упруго-фрикционного гасителя крутильных колебаний и определено место его установки между тепловым двигателем и электромашиной». Однако неясно, почему автор ставит это решение в заслугу разработанного им метода, поскольку оно является классическим и применяется достаточно давно и повсеместно как в трансмиссиях легковых машин с гибридной силовой установкой, так и в судо- и тепловозостроении.

5. В основных выводах по работе автор указывает, что разработанный им метод позволяет повысить достоверность прогнозирования динамической и виброакустической нагруженности силовых передач колесных и гусеничных машин на этапе проектирования. Однако в главе 4 диссертации при реализации нового метода показано, что для уточнения и верификации модальных характеристик используемых конечно-элементных моделей деталей трансмиссии применяются результаты экспериментальных исследований их виброакустических свойств. Необходимость использования конструктивной реализации исследуемых деталей осложняет применение разработанного метода на начальной стадии разработки новых машин.

6. В главе 3 диссертации автор в рамках исследования низкочастотных колебаний элементов трансмиссии при оценке динамической нагруженности силовых передач учитывает массу колес, но не учитывает податливость (крутильную жесткость) шин при формировании математической модели трансмиссии колесных машин. Учет податливости шины при использовании численных методов решения не увеличивает трудоемкость расчетов, однако позволяет оценить наличие опасных низкочастотных колебаний в зоне приводных валов, что в противном случае может быть затруднительным. В связи с этим остается непонятным, почему автором принято решение считать шину жестким телом и учитывать колесо только как крутильную массу.

7. Список литературы включает в себя 137 наименований, из них 63 относятся к зарубежным источникам, из оставшихся – 29 являются классическими изданиями по профильному направлению исследования, не менее 11 источников являются самоцитированием, либо ссылкой на отчеты о НИР, в которых участвовал автор, либо ссылкой на патенты, соавтором которых он является. Таким образом, среди представленных источников только 34 посвящены современному положению теории динамической и виброакустической нагруженности силовых передач, что является достаточно

малым, учитывая разработанность рассматриваемой автором темы отечественными научными школами.

По тексту также имеются незначительные ошибки и опечатки.

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации. Анализ представленных материалов дает право считать диссертацию Тараторкина А.И. завершенным исследованием, в котором изложен научно-методический аппарат, позволяющий эффективно решать научные и инженерные задачи, возникающие в процессе исследований и разработки колесных и гусеничных машин.

Полученные автором результаты свидетельствуют о решении поставленных задач и достижении цели диссертационного исследования. Автореферат в достаточной мере отражает содержание диссертации. Результаты исследований опубликованы в соответствии с требованиями.

Таким образом, несмотря на замечания и пожелания, все научные положения и выводы, изложенные в диссертации, следует считать обоснованными, достоверными и обладающими новизной.

Заключение о соответствии работы требованиям ВАК

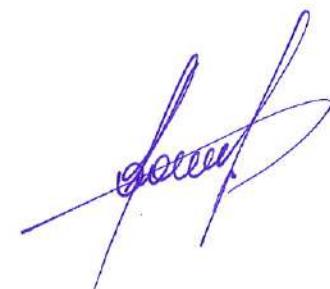
Диссертация Тараторкина Александра Игоревича «Научные методы снижения динамической и вибраакустической нагруженности силовых передач колёсных и гусеничных машин путём вариации модальных свойств» выполнена на актуальную тему и является завершенным трудом, в котором на основании выполненных автором исследований и разработок представлено **решение научной проблемы обеспечения необходимого уровня динамической и вибраакустической нагруженности силовых передач колёсных и гусеничных машин на основе совершенствования модальных свойств**, имеющей важное значение для отрасли транспортного машиностроения, а также обоснованы и разработаны комплекс научных методов, направленных на снижение динамической и вибраакустической нагруженности силовых передач колёсных и гусеничных машин.

Диссертационная работа Тараторкина Александра Игоревича «Научные методы снижения динамической и вибраакустической нагруженности силовых передач колёсных и гусеничных машин путём вариации модальных свойств» соответствует паспорту научной специальности 05.05.03 - «Колесные и гусеничные машины» и требованиям пунктов 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24

сентября 2013 года № 842, а её автор заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 05.05.03 - «Колесные и гусеничные машины».

Отзыв рассмотрен и одобрен 11 апреля 2022 г. на совместном заседании кафедр «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы» и «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Присутствовали 46 чел. Результаты голосования: «за» – 42 чел., «против» – 1 чел., «воздержались» – 3 чел. Протокол №30/21-22 от 11 апреля 2022 г.

Заведующий кафедрой СМ-10
«Колесные машины»
МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н., профессор



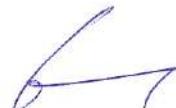
Г.О. Котиев

Заведующий кафедрой СМ-9
«Многоцелевые гусеничные машины
и мобильные роботы»
МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н., доцент



В.А. Горелов

Доцент кафедры СМ-9
«Многоцелевые гусеничные машины
и мобильные роботы»
МГТУ им. Н.Э. Баумана, к.т.н.



А.А. Ципилев

Сведения о ведущей организации:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
Адрес: 105005, г. Москва, ул. 2я Бауманская, д. 5, к. 1
Тел.: +7 (499) 263 63 91
Электронная почта: bauman@bmstu.ru
Сайт: <http://www.bmstu.ru>