

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Шалашилина Александра Дмитриевича «Моделирование гистерезиса при нестационарных колебаниях механических систем» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры»

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ДИССЕРТАЦИИ И СООТВЕТСТВИЕ СПЕЦИАЛЬНОСТИ

Одной из важнейших проблем динамики машин является проблема моделирования диссипативных сил. Сложность ее решения обусловлена разнообразием физической природы диссипации: вязкостью и несовершенной упругостью материала, микропластическими деформациями, трением в сочленениях или в специальных трибоэлементах, вводимых в конструкцию. Для всех этих видов диссипации характерно общее свойство – различие диаграмм нагружения и разгрузки, иначе говоря – гистерезис. Устройства с гистерезисом являются важными элементами конструкций в различных областях машиностроения: демпферы, гасители колебаний, амортизаторы, стабилизаторы. В литературе задачам динамики диссипативных систем уделяется большое внимание, что свидетельствует о востребованности математических моделей, описывающих диссипацию механической энергии. На практике часто необоснованно используется простейшая модель линейного вязкого трения с квадратичной диссипативной функцией, приемлемая, как отмечал еще Релей, только для описания сопротивления воздушной среды при небольших относительных скоростях. В большинстве же конструкций машин диссипация обусловлена внутренним и конструкционным трением. Методы его описания, несмотря на значительное число исследований, начиная с основополагающих работ Н.Н. Давиденкова и Е.С. Сорокина, развиты недостаточно. В особенности это относится к описанию гистерезисных явлений при нестационарных переходных режимах колебаний. Таким образом, тема диссертационной работы соискателя А.Д. Шалашилина является актуальной и соответствует специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ
Вх. № 02 / 12 2019

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов (заключения), списка литературы (121 наименование). Содержание работы изложено на 111 страницах машинописного текста, включает 43 рисунка и 5 таблиц.

Во Введении, в соответствии с требованиями к содержанию и оформлению диссертационных работ: обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, сформулированы полученные результаты, имеющие существенную научную новизну, обоснованы теоретическая и практическая значимость работы, изложены методы исследования, перечислены положения, выносимые автором на защиту диссертационной работы, приведены сведения об апробации результатов и о важнейших публикациях автора.

В первой главе, имеющей обзорный характер, дан анализ существующих методов моделирования гистерезисных процессов в задачах динамики конструкций, упругопластического деформирования, реологического поведения сложных сред. Рассмотрены различные модели трения, учитывающие эффект Штрибека, скачкообразность скольжения и другие особенности процесса. Описаны феноменологические модели, использующие подхода «чёрного ящика», развитый в работах Ф. Прейзаха, М.А. Красносельского, А.В. Покровского и их последователей. Автор акцентирует внимание на феноменологической модели Бук-Вена, использующей метод «чёрного ящика». Параметры модели определяются с использованием методов идентификации по экспериментальным данным для некоторого «эталонного» входного сигнала. Обращается внимание на то, что известные из литературы примеры говорят о неоднозначности такой идентификации, которая может приводить к ошибкам моделирования. В заключение первой главы даётся краткая характеристика двух феноменологических моделей, разработанных автором и выносимых на защиту диссертационной работы

Вторая глава содержит результаты экспериментальных исследований диссипации механической энергии на примере гасителя колебаний, предназначенного для борьбы со специфическим и опасным явлением – низкочастотными колебаниями проводов воздушных линий электропередачи с амплитудой порядка стрелы провисания (до 10 м) и частотой ≈ 1 Гц. Рассмотрена одна из возможных конструкций такого гасителя - демпфирующее устройство

маятникового типа с выраженной петлёй гистерезиса у упругих демпфирующих элементах. Описывается конструкция гасителя и экспериментальный стенд, на котором испытывалось это устройство. Приводятся результаты обширных экспериментальных исследований гистерезисных траекторий при нестационарном нагружении демпферного узла гасителя. На базе проведенных экспериментальных исследований автором предложены две излагаемые далее феноменологические модели гистерезиса.

В третьей главе излагаются и анализируются предложенные модели, позволяющие построить непрерывную (не гладкую) гистерезисную траекторию на диаграмме состояния при произвольном нестационарном внешнем воздействии на механическое устройство. Так как модели носят феноменологический характер, их параметры идентифицируются по известным входным и выходным данным. Первая модель основывается на использовании данных серии типовых экспериментов. По этим данным строятся опорные кривые нагружения (гистерезисные петли, соответствующие установившемуся режиму с максимальной амплитудой) с использованием аппроксимации полиномами Чебышева. Существенно, что ввиду частотной независимости внутреннего трения они определяются только амплитудой цикла и определены в статических опытах. Опорные кривые далее используются в качестве криволинейной координатной сетки для построения переходных траекторий. Этим достигается построение физической зависимости для переходных режимов, что является одним из основных научных результатов, обладающим существенной новизной.

Вторая модель, названная автором «кинематической», развивает модель Бук-Вена, согласно которой силовые и кинематические параметры связываются дифференциальным уравнением первого порядка, содержащего функцию-знак, определяющую направление процесса. Новым является представление правой части уравнения в виде полинома от двух переменных, определяющих траекторию гистерезиса; коэффициенты полинома определяются методами приближения с использованием экспериментальных данных для ветвей «нагрузки» и «разгрузки» объемлющего цикла с максимальной амплитудой. Основное уравнение, по существу являющееся уравнением состояния демпфирующего элемента, вводится в систему уравнений динамики исследуемой системы.

В четвертой главе на основе разработанной теории даётся математическая модель нелинейных нестационарных колебаний маятникового гасителя колебаний проводов ЛЭП. Предложен алгоритм анализа эффективности гасителя с точки зрения диссипации кинетической энергии колебаний. Представлены результаты сравнительных вычислений эффективности диссипации для двух вариантов гасителя. Сравнения экспериментальных результатов с теоретическими, полученными с использованием разработанной математической модели показали их соответствие с приемлемой для практики точностью.

Пятая глава посвящена перспективной задаче использования электрореологических, так называемых «умных материалов», изменяющих свои свойства по действием электрического поля, для управления процессами колебаний механических систем, практически – для создания принципиально новых систем виброзащиты. Для оценки перспектив этого направления необходимо серьезное экспериментальное изучение реологии таких материалов. Автором на основе разработанной им кинематической модели исследованы кривые течения сложной по составу электрореологической среды - суспензии полиимидов под воздействием внешнего электрического поля в условиях нестационарного циклического воздействия. В отличие от предыдущих моделей, рассчитанных на системы с конечным числом степеней свободы, в данном случае базовое уравнение модели должно включаться в систему уравнений сплошной среды в пространственной или материальной формулировке. Поэтому базовое уравнение преобразуется к своеобразной форме, связывающей скорость изменения сдвигового напряжения и «ускорение» сдвига. Представляют большой практический интерес экспериментальные данные о связи напряжений и скорости сдвига.

В Заключении перечислены результаты работы, составляющие основу проведенного исследования, имеющие научную новизну и практическую ценность.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Впервые разработана феноменологическая модель гистерезиса при нестационарных режимах колебаний на основе построения переходных траекторий между стационарными диаграммами «нагрузка-разгрузка».

Впервые сформулирована феноменологическая модель гистерезиса, обобщающая модель Бук-Вена; обобщение состоит в предложении использовать

уравнение «черного ящика» с правой частью в виде полинома переменных «вход-выход», коэффициенты которого определяются из соответствующего эксперимента по условию минимума невязки аналитического представления и опытных данных.

Впервые теоретически получен и экспериментально подтвержден закон течения течения электрореологической среды под воздействием внешнего электрического поля в условиях нестационарного циклического воздействия.

Анализ современной научной литературы по теме диссертационной работы позволяет сделать положительное заключение о новизне полученных автором результатов, удовлетворяющих требованиям к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук.

ДОСТОВЕРНОСТЬ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Достоверность разработанных математических моделей и численных алгоритмов основывается на использовании фундаментальных законов механики, использованием строгих математических методов и сравнениями теоретических результатов с результатами экспериментальных исследований.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Результаты выполненных исследований могут быть использованы при расчете и проектировании систем виброзащиты с демпфирующими элементами внутреннего трения. Представленные автором математические модели гистерезиса могут быть включены в модели более высокого уровня, описывающие динамическое поведение сложных технических систем с диссипативными элементами гистерезисного типа. В частности, разработанный алгоритм анализа эффективности энергорассеяния использован автором при проектировании маятниковых торсионно-демпферных гасителей пляски проводов ЛЭП.

Основные результаты, выводы и рекомендации диссертации опубликованы в 9 печатных работах, в том числе в 2-х статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ, и 2-х статьях, цитируемых интернет-платформой Web of Science.

Содержание диссертации соответствует содержанию опубликованных работ. Существенных замечаний к качеству оформления диссертации нет.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации и дает адекватное представление о выполненной работе.

ЗАМЕЧАНИЯ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. В обзорной части работы не отмечены заслуживающие того исследования Е.С. Сорокина, Г.С. Писаренко и В.А. Пальмова по частотнонезависимому внутреннему трению и исследования А.Ю. Ишлинского и Ю.И. Кадашевича по циклическим микропластическим деформациям, положившие начало широко применяемой на практике концепции комплексного модуля упругости.

2. Так как в работе представлены две феноменологические модели гистерезиса, было бы целесообразно провести их сопоставление и сформулировать рекомендации по применению той или иной модели в практических задачах.

3. Выполненные исследования могли бы, по-видимому, прояснить вопрос о применимости концепции комплексного модуля упругости, широко используемой на практике для расчета гармонических колебаний, к задачам нестационарных динамических процессов. К сожалению, это не было сделано, хотя логика проделанной работы подсказывает такую возможность.

Указанные замечания не снижают научной ценности и практической значимости результатов, полученных автором в диссертационной работе и должны рассматриваться как рекомендации автору диссертации на будущее.

Оценивая работу в целом, считаю, что диссертация является законченной самостоятельной квалификационной работой, посвященной математическому моделированию процессов диссипации энергии в задачах нестационарной динамики машин.

Диссертация соответствует требованиям п. 9. Положения о присуждении учёных степеней, а её автор, Шалашилин Александр Дмитриевич безусловно заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

Официальный оппонент

Фельдштейн Валерий Адольфович,

доктор технических наук, главный научный сотрудник АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (АО «ЦНИИмаш»), профессор базовой кафедры «Космические летательные аппараты» МФТИ.

адрес места работы: 141070, Московская область, г. Королёв, ул. Пионерская, д. 4.

тел.: +7 (910) 455-61-30; e-mail: dinpro@mail.ru

Почтовый адрес: 141068, г. Королев, ул. Тарасовская, д. 19, кв. 35.

Специальность ВАК, по которой защищена

докторская диссертация: 05.07.03 – прочность и тепловые режимы летательных аппаратов.

В.А. Фельдштейн

Подпись В.А. Фельдштейна заверяю.

Главный ученый секретарь АО «ЦНИИмаш»,

д.т.н., профессор

Ю.Н. Смагин

