

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

**Шалашилина Александра Дмитриевича**

«Моделирование гистерезиса при нестационарных колебаниях механических систем», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры»

**Актуальность темы диссертации.** Диссертация посвящена разработке математических моделей для описания гистерезисных процессов в элементах конструкций и систем в условиях нестационарных колебаний. Актуальность представленной диссертационной работы определяется прежде всего востребованностью такого рода моделей для применения в разработках новой перспективной техники в различных областях машиностроения. Как правило, известные из литературы подходы к описанию гистерезисных процессов в динамических системах применимы для решения частных задач. Их разработка трудоёмка и требует привлечения квалифицированных специалистов и научных сотрудников. В ограниченных по времени условиях часто это выполнить затруднительно или невозможно. Поэтому для расчётов целесообразно привлекать феноменологические модели, которые строятся с использованием экспериментальных данных из испытаний опытных образцов, макетов или прототипов. Такие модели строятся, рассматривая динамическую систему как «чёрный ящик» с известными сигналами на входе и выходе. Разработке таких моделей, обладающих достаточной общностью, посвящена настоящая работа. Сказанное позволяет сделать вывод об **актуальности** исследования, предпринятого в диссертации А.Д. Шалашилина.

**Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют давать научно обоснованные рекомендации по выбору конструктивных и жесткостных параметров динамических систем на основе моделирования нестационарных

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ  
Вх. № 02 / 12 20 19



динамических процессов во времени с учётом гистерезиса энергорассеяния в элементах конструкций.

**Фундаментальное научное значение** заключается в разработке двух феноменологических моделей, позволяющих описывать нестационарные гистерезисные процессы. Особый интерес представляет кинематическая модель, основанная (подобно модели Бук-Вена) на использовании обыкновенного дифференциального уравнения, связывающего основные физические (кинематические и силовые) параметры процесса. Модель достаточно общая и может применяться для описания различных по природе динамических процессов.

**Научная новизна.** Впервые предложены математические модели, позволяющие моделировать гистерезисные траектории на диаграммах состояния без детального описания поведения составляющих элементов динамической системы. Моделирование осуществляется в рамках подхода «чёрного ящика», когда общее поведение системы описывается уравнениями и алгоритмами, построенными с использованием экспериментальных данных для типовых или эталонных экспериментов.

Наиболее значимыми являются следующие результаты, определяющие **научную новизну** диссертационной работы.

1. Получен большой объем экспериментальных данных для двух диссипативных систем – маятникового гасителя торсионно-демпферного типа и механической системы «реовискозиметр – электрореологическая суспензия». Выполнен подробный анализ полученных данных, на основе которых сформулированы свойства идеализированной физической модели, которая далее позволила дать математическую формулировку двух феноменологических моделей гистерезиса.

2. Впервые сформулирована феноменологическая модель гистерезиса с использованием регулярной криволинейной координатной сетки. Каждая кривая сетки представляет собой кривую нагружения системы, которая получается в результате типовых или эталонных экспериментов. Аналитическая



аппроксимация экспериментальных данных проводилась с использованием рядов по полиномам Чебышева. Гистерезисные кривые промежуточных состояний (между кривыми координатной сетки) строятся с использованием линейной интерполяции. Такой подход позволил сформулировать алгоритм моделирования гистерезисной траектории в области объемлющего цикла, то есть между кривыми «нагрузки» и «разгрузки» цикла установившихся колебаний с максимальной амплитудой.

3. Впервые сформулирована феноменологическая модель гистерезиса, математическая запись которой, подобно модели Бук-Вена, заключается в использовании обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка. В правой части уравнения содержится функция-переключатель, определяющая направления течения процесса («нагрузку» или «разгрузку»). В отличие от модели Бук-Вена правая часть уравнения имеет вид полинома от двух переменных – параметра гистерезисного процесса, зависящего от времени, и функции этого параметра. Полиномиальные коэффициенты определяются методами приближения, минимизируя невязку аналитического представления к множеству значений, полученных в экспериментах для объемлющего (включающего всевозможные гистерезисные траектории) цикла установившихся колебаний. В работе утверждается, что гистерезисные кривые внутренних циклов асимптотически подобны кривым объемлющего цикла: локальные кривые асимптотически приближаются к соответствующим кривым объемлющего цикла при монотонном изменении параметра процесса. Скорость приближения и форма кривых регулируются числом членов двойной суммы в правой части кинематического уравнения, описывающего гистерезисную траекторию. Знак скорости изменения параметра процесса определяет направление его течения. Данное утверждение подтверждено вычислительными экспериментами для рассмотренных в диссертации диссипативных систем.

4. Исследованы новые задачи о нестационарных колебаниях сложных технических систем с гистерезисом энергорассеяния в демпфирующих элементах.



Предложена математическая модель колебаний маятникового гасителя торсионно-демпферного типа, которая позволила дать оценку эффективности различных конструктивных схем исполнения устройства. Является важным в прикладном отношении разработанный автором алгоритм расчёта эффективности, который позволил установить частотные диапазоны, где та или иная конструктивная схема наиболее эффективна.

В диссертационной работе дано сопоставление результатов, полученных экспериментально и теоретически с использованием разработанной кинематической модели. Сравнение показало хорошее соответствие этих результатов, что свидетельствует об адекватности математического моделирования реальным процессам.

Представляет значительный интерес раздел, посвященный моделированию кривых течения электрореологических суспензий в рабочем узле реовискозиметра. Электрореологические суспензии (ЭРС), которые, как известно, относятся к числу «умных материалов», представляют в настоящее время исключительный интерес в разработках новых устройств для активного или пассивного демпфирования, стабилизации и управления различными аппаратами. Реологические и механические свойства этих сред (вязкость, предел текучести, модуль сдвига, и др.) могут резко изменяться под воздействием внешнего электрического поля. При воздействии поля жидкотекучая среда может проявлять свойства вязкопластического объекта.

В работе получено дифференциальное уравнение, описывающее кривые течения в условиях нестационарного воздействия. В результате обработки серии экспериментов реконструирована история нагружения среды и получены гистерезисные циклы, по которым можно судить о гистерезисе и, как следствие, о структурных превращениях в среде под воздействием электрического поля.

**Достоверность** результатов, полученных в диссертации, обеспечена использованием физически обоснованных моделей, опирающихся на большой объем экспериментальных данных; аккуратностью использования известных математических методов; хорошим соответствием результатов, полученных



экспериментально и в результате расчётов по разработанным моделям; согласованностью с известными подходами для описания гистерезисных процессов (модель Бук-Вена).

В первой главе диссертации содержится подробный обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных динамическим системам с гистерезисом энергорассеяния.

**Апробация.** Результаты исследования доложены на ряде авторитетных всероссийских научных конференциях и всероссийских конференциях с международным участием. Имеется достаточное число публикаций в журналах, рекомендованных ВАК и цитируемых интернет-платформой Web of Science.

**Автореферат** даёт чёткое представление о диссертации и в полной мере отражает её содержание.

**Диссертация** хорошо оформлена, написана понятным языком, содержит для понимания достаточное число иллюстраций и таблиц.

По тексту диссертационной работы можно сделать следующие **замечания**:

1. Во второй главе диссертации приведены примеры достаточно сложных гистерезисных траекторий. Однако отсутствуют пояснения, как они были получены. По каким правилам (закону) осуществлялось нагружение?

2. В третьей главе диссертации приводится описание алгоритма моделирования гистерезисной траектории с использованием опорных кривых нагружения. Для понимания недостаточно информации о необходимом количестве опорных кривых. Отсутствуют результаты сравнительных вычислений при различном количестве опорных кривых.

3. В третьей главе даётся также описание кинематической модели, основанной на использовании обыкновенного дифференциального уравнения с правой частью в виде полинома от двух переменных – параметров, описывающих гистерезисную траекторию на диаграмме состояния. В работе явно не сказано, как выбирались целочисленные параметры верхних пределов

суммирования. Было бы желательно представить результаты параметрического анализа зависимости решения от этих целочисленных параметров.

4. Теоретически не исследован вопрос об асимптотической устойчивости решения, то есть асимптотического приближения локальных кривых к кривым объемлющего цикла.

Сделанные замечания не меняют общую положительную оценку диссертации, которая является законченным исследованием, выполненным на высоком научном уровне. Результаты представляют несомненный интерес в расчётной практике в разработках технических устройств для демпфирования, гашения, стабилизации и управления движением и колебаниями различных конструкций. Полученные результаты являются новыми и достаточно полно описаны в публикациях автора.

Считаю, что диссертационная работа на тему: «Моделирование гистерезиса при нестационарных колебаниях механических систем» соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а ее автор Шалашилин Александр Дмитриевич заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

Официальный оппонент

Темнов Александр Николаевич,

кандидат физико-математических наук;

доцент кафедры «Космические аппараты

и ракеты-носители» ФГБОУ ВО «Московский

государственный технический университет

им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский

университет (МГТУ им. Н.Э. Баумана);



адрес места работы: 105005, г. Москва,

2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.;

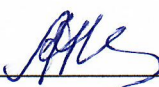
почтовый адрес: 115407, Москва, улица Затонная, д. 4, кв. 115;

тел.: +7 (916) 428-68-71;

e-mail: antt45@mail.ru

Специальность ВАК, по которой защищена

кандидатская диссертация: 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

 \_\_\_\_\_ А.Н. Темнов

Подпись А.Н. Темнова заверяю.

.....



 А.Т. МАТВЕЕВ

З.АМ. НАЧ. УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ

ТЕЛ 8499-263 07 00

М.П.