

На правах рукописи



ШАЛАШИЛИН АЛЕКСАНДР ДМИТРИЕВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИСТЕРЕЗИСА ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ КОЛЕБА-
НИЯХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Специальность 01.02.06

Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институте прикладной механики Российской академии наук и федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

Данилин Александр Николаевич

Официальные оппоненты: **Фельдштейн Валерий Адольфович**, доктор технических наук, профессор, начальник отдела АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (ЦНИИмаш, г. Королёв)

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, г. Москва)

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (г. Саратов)

Защита состоится «18» декабря 2019 г. в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.125.05 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=108362

Автореферат разослан « » октября 2019 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета

Федотенков Григорий Валерьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Современные технические системы, как правило, включают в себя диссипативные элементы с пассивным или активным способом рассеяния механической энергии. К таким системам относятся, прежде всего, гистерезисные муфты, гистерезисные электродвигатели, демпфирующие устройства (демпферы, амортизаторы, гасители) различных конструктивных схем и различного применения.

Различные вопросы общей и прикладной теории диссипативных систем с гистерезисом исследовали многие авторы, в том числе: Давиденков Н.Н., Красносельский М.А., Лебедев А.Б., Мацепуро А.Д., Пановко Я.Г., Покровский А.В., Рейнер М., Al-Bender F., Asano S., Berstein D.S., Bouc R., Bullough W.A., Dahl P.R., Drincic B., Fassois S.D., Faunce C.A., Foliente G.C., Foxon M.B., Freidovich L., Granato A., Grundy P.J., Gutzler U., Hagedorn P., Ikhoulane F., Ishii K., Ismail M., Johansson R., Lampaert V., Lane R., Lazan B.J., Leenen R., Lei L., Li Y., Ludlow J.L.C., Lücke K., Mañosa V., Mayergoyz I.D., Maylin M.G., Mielke A., Nová I., Nowick A.S., Oh J., Padthe A.K., Parker S.F.H., Preisach F., Read T.A., Rieger M.O., Rizos D.D., Robertsson A., Rodellar J., Roubíček T., Shiriaev A., Swevers J., Visintin A., Wen Y.K., Wu X.D., Yang X. W., Zemánek I., Zuo S.G.

Как следует из приведенного в диссертации обзора публикаций, для математического описания гистерезиса авторы предлагают модели, опираясь на конкретные представления о физическом явлении. Несмотря на специфику моделей, ряд из них можно использовать для описания иных по природе процессов. Это свидетельствует не только о «глубине» математических моделей, но и, в большей степени, – об общих чертах различных по природе гистерезисных процессов.

В динамике сложных механических систем, составные элементы которых взаимодействуют друг с другом силами различной природы, построение теоретических моделей с идентификацией их параметров представляет собой непростую задачу. В таких случаях механическую систему можно рассматривать как «черный ящик» с известными из эксперимента значениями вход-

ных и выходных параметров. Взаимосвязи между этими параметрами устанавливаются на основе феноменологических моделей, параметры которых идентифицируются с использованием экспериментальных данных. В диссертационной работе отмечается модель Бук-Вена, которая широко используется авторами в рамках подхода "черного ящика". Предложенная в диссертационной работе кинематическая модель является развитием модели Бук-Вена применительно к диссипативным механическим системам в условиях нестационарных колебаний.

Целью диссертационной работы является разработка аналитических методов описания нестационарного гистерезиса сложных систем, которые рассматриваются как «чёрный ящик» с известными из эксперимента значениями входных и выходных параметров.

Актуальность темы исследования обусловлена в теоретическом плане малой изученностью нестационарных гистерезисных процессов в механике сложных систем. С практической точки зрения она связана с востребованностью математического описания механики деформирования (изменения конфигурации) диссипативных систем в условиях нестационарного колебательного движения.

Методы исследования. Экспериментальные методы с использованием уникального специализированного стенда и сертифицированных измерительных комплексов. Для математического описания гистерезисных траекторий используются два подхода. Первый основан на использовании данных серии типовых экспериментов по построению опорных или «скелетных» кривых нагружения. Опорные кривые используются далее в качестве своеобразной криволинейной координатной сетки, которая позволяет построить траекторию гистерезиса между кривыми «нагрузки-разгрузки» цикла установившихся колебаний с максимальной амплитудой. Вторым подходом, названным кинематическим, основан на использовании обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка. В отличие от подобной модели Бук-Вена, правая часть этого уравнения выбирается в виде полинома от двух переменных – параметра гистерезисного процесса, зависящего от времени, и функции

этого параметра. Полиномиальные коэффициенты правой части определяются методами приближения, минимизируя невязку аналитического представления к множеству значений, полученных в экспериментах.

Достоверность и обоснованность результатов научных положений и полученных результатов подтверждается использованием строгих математических методов и сравнениями теоретических результатов с результатами экспериментальных исследований.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Выполнены экспериментальные исследования гистерезиса энергорассеяния двух сложных диссипативных систем – маятникового гасителя торсионно-демпферного типа и механической системы «реовискозиметр – электрореологическая суспензия», которые легли в основу формулировок двух феноменологических моделей.

2. Впервые сформулирована феноменологическая модель гистерезиса с использованием опорных или «скелетных» кривых нагружения, которые строятся на основе серии типовых экспериментов и используются далее в качестве криволинейной координатной сетки, позволяющей моделировать траекторию между кривыми «нагрузки-разгрузки» цикла установившихся колебаний с максимальной амплитудой.

3. Впервые сформулирована феноменологическая модель гистерезиса, названная кинематической, с использованием обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка с правой частью в виде 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.

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

Практическая значимость состоит в разработке методов исследования нестационарных колебаний сложных механических систем с учётом гистерезиса диссипации энергии, а также в возможности использования разработанных подходов для анализа эффективности работы устройств с пассивным или активным способом рассеивания механической энергии.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения.

1. Результаты экспериментальных исследований гистерезисных процессов двух диссипативных систем – маятникового гасителя торсионно-демпферного типа и механической системы «реовискозиметр – электрореологическая среда», которые легли в основу формулировок двух феноменологических моделей гистерезиса.

2. Формулировка феноменологической модели гистерезиса с использованием опорных или «скелетных» кривых нагружения, которые используются в качестве криволинейной координатной сетки, позволяющей моделировать траекторию между кривыми «нагрузки-разгрузки» цикла установившихся колебаний с максимальной амплитудой.

3. Формулировка феноменологической модели гистерезиса на основе обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка с правой частью в виде полинома от двух переменных – параметра гистерезисного процесса, зависящего от времени, и функции этого параметра с идентификацией полиномиальных коэффициентов по экспериментальным данным для установившегося цикла установившихся колебаний.

4. Математическая модель нелинейных колебаний маятникового гасителя торсионно-демпферного типа, на основе которой построен и реализован алгоритм для анализа эффективности и оптимизации конструкций маятниковых гасителей с гистерезисом энергорассеяния.

5. Результаты решения задач о нестационарных колебаниях двух диссипативных систем с гистерезисом энергорассеяния – маятникового гасителя торсионно-демпферного типа и механической системы «реовискозиметр – электрореологическая среда».

Апробация основных результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Российских и Международных конференциях и симпозиумах:

- II Всероссийская научная конференции «Механика наноструктурированных материалов и систем» (ИПРИМ РАН, Москва, 17–19 декабря 2013 г.);

- XVIII Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2013) (Алушта, 22–31 мая 2013 г.);

- IV Всероссийский симпозиум «Механика композиционных материалов и конструкций» (ИПРИМ РАН, Москва, 4–6 декабря 2012 г.);

- Всероссийская конференция «Механика наноструктурированных материалов и систем» (ИПРИМ РАН, Москва, 13–15 декабря 2011 г.);

- Всероссийская конференция «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» (ИПРИМ РАН, Москва, 23–25 ноября 2010 г.).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 9 печатных работах, в том числе в 2 статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 2 статьях в журналах, цитируемых интернет-платформой Web of Science и 5 тезисах докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников, включающего 121 наименование. Общий объем диссертации 111 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность научных исследований, изложенных в диссертации, а также сформулированы цели, определена научная новизна, практическая и теоретическая ценность диссертационной работы.

В первой главе дан аналитический обзор современных научных исследований, посвященных исследованию гистерезисных процессов. Рассмотрены классические модели для задач динамики конструкций, упруго-пластического деформирования, реологического поведения сложных сред.

Перечислены статические модели трения. Отмечены особенности динамических моделей трения, которые учитывают эффект Штрибека, гистерезис поверхностных микропластических деформаций, скачкообразность скольжения и др. Особый интерес представляют феноменологические модели, которые применяются для описания разнообразных по природе гистерезисных эффектов. В этом случае система рассматривается как «черный ящик» с известными из эксперимента значениями входных и выходных параметров. Взаимосвязи между ними устанавливаются на основе математических зависимостей, параметры которых идентифицируются с использованием экспериментальных данных. Значительную группу феноменологических моделей образуют такие, которые строятся с использованием спектральных разложений по релейным нелинейностям.

Среди феноменологических моделей отмечается модель Бук-Вена, которая используется многими авторами, как правило, в рамках подхода "черного ящика". Общей формой записи модели Бук-Вена, преобразующей входной сигнал q , зависящий от времени t , в сигнал f на выходе, является дифференциальная связь в виде:

$$\frac{df}{dt} = g\left(q, f, \operatorname{sgn}\left(\frac{dq}{dt}\right)\right) \cdot \frac{dq}{dt}, \quad (1)$$

где g – выбранная кусочно-гладкая функция, идентификация которой осуществляется по экспериментальным данным опорного сигнала. Уравнение (1) включается в общую систему уравнений динамики системы, содержащие $q(t)$ и $f(q(t))$ в качестве неизвестных функций. В настоящее время эта модель успешно применяется в различных научно-технических областях благодаря возможности аналитического описания разнообразных по форме гистерезисных петель. В литературе сформулированы условия, которым должна удовлетворять модель Бук-Вена. Основными являются адекватность математической модели физическому процессу и её устойчивость (BIBO stability). Применение методов идентификации позволяет определить параметры модели так, чтобы ошибка (расхождение) между выходными данными, полученными из эксперимента и вычислениями по алгоритмам модели, было до-

статочно мала. Расчёты осуществляют для заданного (опорного) входного сигнала. После этого модель используется для моделирования гистерезиса при других входных сигналах. Однако известны примеры, когда найденные параметры модели не обеспечивают соответствие результатов вычислений данным, полученных из экспериментов для иных входных сигналов. Такие примеры говорят о неоднозначности идентификации, которая может приводить к неустойчивости модели относительно входного сигнала.

Общим недостатком указанных моделей является и то, что они не позволяют получить простые аналитические представления или алгоритмы, позволяющие моделировать гистерезисную траекторию в условиях нестационарного поведения системы.

В диссертационной работе на основе экспериментальных исследований предложены и проанализированы две феноменологические модели, пригодные для описания гистерезисных зависимостей в условиях нестационарного колебательного движения. Рассмотрены примеры эффективного их применения в расчётах энергорассеяния реальных технических систем.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям гистерезиса энергорассеяния на примере маятникового гасителя торсионно-демпферного типа (TDD), предназначенного для демпфирования и рассогласования частот вертикальных и крутильных колебаний, возникающих при пляске (галопировании) проводов ЛЭП. Фотография, общий вид и схема работы гасителя представлены на рис. 1. Демпферный узел гасителя представляет собой систему из двух соосных дисков – ведущего и ведомого, между которыми зажимаются резиновые шарики, способные двигаться по профилированным каналам. Движение проводов через тяги передаётся к ведущим дискам гасителя. В силу инерционности маятника происходит прокручивание ведущих дисков относительно ведомых, скреплённых с маятником. При этом происходят перемещения шариков по каналам, образуемым криволинейными углублениями на поверхностях дисков. При этом перемещение шариков

сопровождается их значительным деформированием и трением о поверхности каналов, что является причиной гистерезиса.

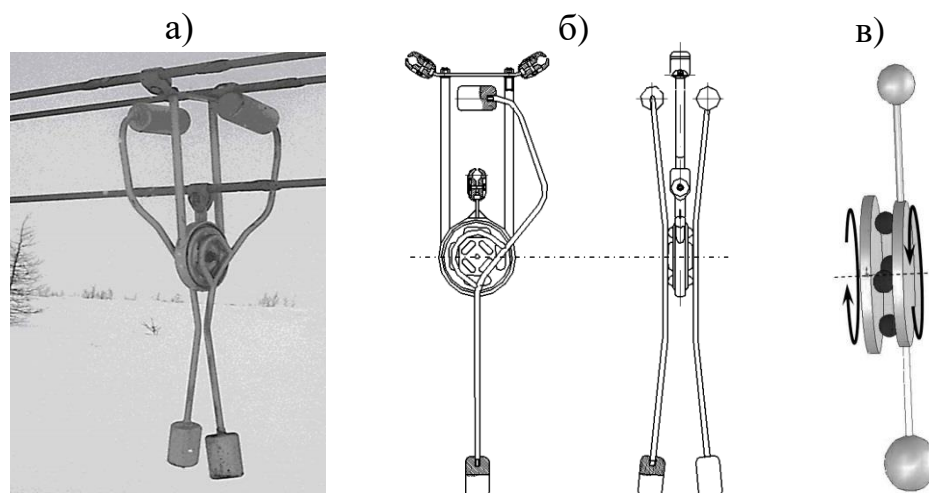


Рис. 1.

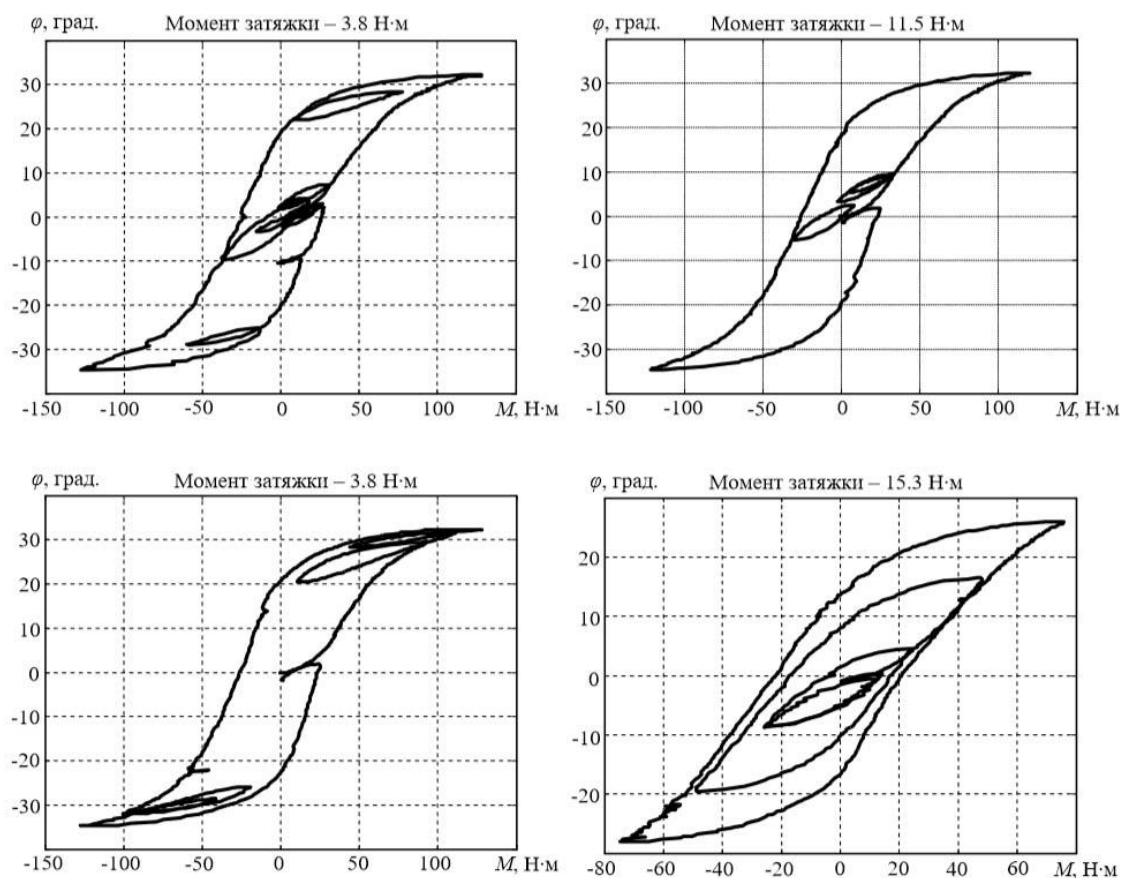


Рис. 2.

В главе приведены результаты экспериментального исследования, сформулированы определяющие положения, которые легли в основу двух феноменологических моделей.

На рис. 2 даны примеры полных и вложенных в них локальных гистерезисных петель при квазистатическом нагружении TDD с различными моментами затяжки ведущего и ведомого дисков.

В третьей главе на основе проведенных экспериментальных исследований дана формулировка двух феноменологических моделей.

Первая модель носит «конструктивный» характер, поскольку основывается на использовании данных серии типовых экспериментов по построению опорных или «скелетных» кривых нагружения. Опорные кривые используются далее в качестве своеобразной криволинейной координатной сетки, которая позволяет построить траекторию гистерезиса между кривыми «нагрузки-разгрузки» цикла установившихся колебаний с максимальной амплитудой. Гистерезисные кривые промежуточных состояний (между опорными кривыми) строятся с использованием линейной интерполяции.

Считается, что процесс деформирования демпферного узла состоит из двух стадий. Начальная стадия связана главным образом со сдвиговой деформацией резиновых элементов узла. Эта часть диаграммы составляет незначительную часть траектории от начала до реверсивной смены знака нагружения (около $1 \div 2^\circ$ по углу поворота), однако эта зона влияет на дальнейший процесс – 2-ю стадию, связанную с качением и скольжением шариков по специальным направляющим.

Каждая опорная кривая из семейства экспериментальных кривых представлена достаточно большим множеством точек $\{M_{kj}, \varphi_{kj}\}$, $j = 1, 2, \dots, N_k$, $N_k \approx 100 - 250$ (k – номер эксперимента или номер экспериментальной кривой), снятых с тензометрического и углового датчика на стенде, и в своем исходном виде не приемлема для использования в математической модели демпферного узла. Поэтому для каждой из кривых производилась аналитическая аппроксимация экспериментальных данных с использованием рядов по полиномам Чебышева $p_n(t)$, $t \in (-1, 1)$.

На рис. 3 показаны результаты аналитического моделирования опорных кривых нагружения. Отклонение маятника осуществлялось по программе со-

ответствующих экспериментальных исследований. Угол отклонения φ (град.) изменялся по закону: $\{\varphi\} = \{0, -38.0; 38.0; -28.86; 38.0; -22.48; 38.0; -17.62; 38.0; -11.84; 38.0; -6.77; 38.0; -2.1; 38.0; 2.69; 38.0; 8.73; 38.0; 13.16; 38.0; 17.81; 38.0; 22.39; 38.0; 28.22; 38.0; 34.22; 38.0\}$.

На рис. 4 показан более сложный пример, где моделируется как объемлющий цикл, так и локальные циклы, возникающие при нестационарном внешнем воздействии. Отклонение маятника также осуществлялось по программе соответствующих экспериментальных исследований. Угол отклонения φ (град.) изменялся по закону: $\{\varphi\} = \{0., 33.7, 22.2, 36.6, 30.7, 38., -32.9, -29.4, -32.8, -26.4, -37.9, 2.42, -1.83\}$.

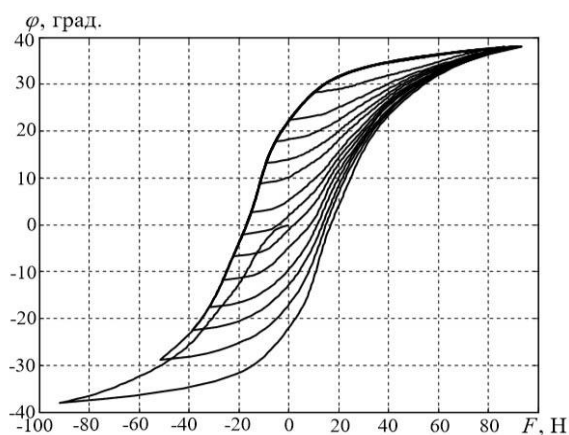


Рис. 3.

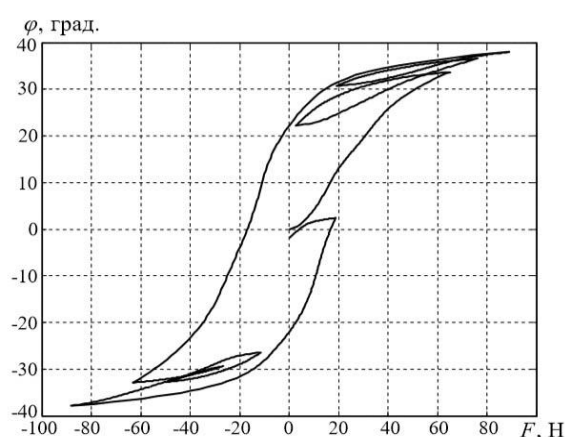


Рис. 4.

В третьей главе даётся также формулировка другой феноменологической модели, названной кинематической, и представляющей собой развитие известной модели Бук-Вена. Эта модель, так же, как и модель Бук-Вена, основывается на обыкновенном дифференциальном уравнении первого порядка, однако содержит правую часть в виде полинома от двух переменных – параметров, описывающих гистерезисный процесс. Неизвестные коэффициенты полинома определяются по экспериментальным данным для кривых объемлющего цикла, область которого содержит любую возможную траекторию гистерезиса.

Кинематическая модель сформулирована на основе идеализированной физической модели со свойствами:

Свойство 1. Считается, что любая физически возможная траектория гистерезиса принадлежит области объемлющего цикла, который строится по экспериментальным данным для максимально допустимого диапазона изменения параметра процесса $q_{\min} \leq q(t) \leq q_{\max}$.

Свойство 2. Гистерезисный процесс рассматривается как частотно-независимый. В этом случае гистерезисные кривые объемлющего цикла можно получить на основе квазистатических испытаний.

Свойство 3. Считается, что все локальные кривые прямых процессов асимптотически подобны кривой O^+ , так же как и все локальные кривые обратных процессов асимптотически подобны O^- . Это означает, что при монотонном изменении параметра q каждая локальная кривая стремится к соответствующей кривой объемлющего цикла. Например, на рис. 5 кривая с начальной точкой (q_k, f_k) стремится с уменьшением q к кривой O^- , кривая с начальной точкой (q_{k+1}, f_{k+1}) стремится с возрастанием q к кривой O^+ и т.д. Причём, все локальные кривые, продолженные при $q \rightarrow q_{\min}$ или $q \rightarrow q_{\max}$, сходятся в точках (q_{\min}, f_{\min}) и (q_{\max}, f_{\max}) согласно направлению процесса.

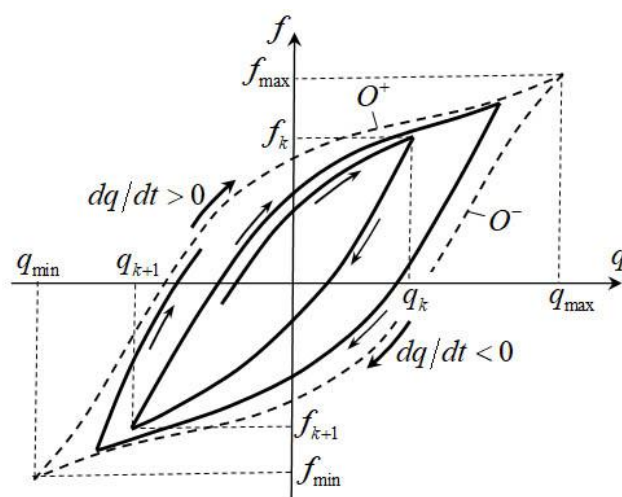


Рис. 5.

Для описания гистерезисной траектории внутри объемлющего цикла предложено использовать обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка с правой частью в виде полинома от двух переменных q и f :

$$\frac{df}{dq} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m C_{ij} q^{i-1} f^{j-1}. \quad (2)$$

Коэффициенты C_{ij} в (2) определяются методами приближения с использованием экспериментальных данных для двух кривых (ветвей) объемлющего цикла. Поэтому матрица $\|C_{ij}\|$ имеет два набора значений, которые обозначаются как $\|C_{ij}^+\|$ и $\|C_{ij}^-\|$. Выбор между ними осуществляется по правилу:

$$C_{ij} = \begin{cases} C_{ij}^+, & dq/dt \geq 0, \\ C_{ij}^-, & dq/dt < 0. \end{cases} \quad (3)$$

Уравнение (2) должно быть присоединено к уравнениям движения системы для интегрирования по времени при заданных начальных условиях. Для этого производная df/dq преобразуется к виду $df/dq = (df/dt) \cdot (dq/dt)^{-1}$ и подставляется в левую часть (2). Последующее умножение на dq/dt приводит к дифференциальному соотношению

$$\frac{df}{dt} = \frac{dq}{dt} \cdot \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m C_{ij} q^{i-1} f^{j-1}, \quad (4)$$

которым дополняются уравнения движения системы. Знак dq/dt определяет направление гистерезисного процесса, а также набор констант в соответствии с (3).

В силу (3) прямой и обратный процессы описываются разными уравнениями. В точках q_k , когда $dq/dt = 0$, происходит смена одного уравнения на другое, однако непрерывность $q(t)$ не нарушается. Эта смена чередуется в процессе интегрирования по времени.

Уравнения (4), соответствующие двум наборам констант (3), можно объединить, если воспользоваться функцией-переключателем $\text{sgn}(v)$, где $v = \dot{q} = dq/dt$ – скорость. Тогда вместо (4) и (3) можно записать одно уравнение

$$\frac{df}{dt} = \frac{v}{2} \cdot \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m \left[(1 + \text{sgn } v) C_{ij}^+ + (1 - \text{sgn } v) C_{ij}^- \right] q^{i-1} f^{j-1}, \quad (5)$$

которым моделируются как прямой, так и обратный процессы. Уравнение (5) является частной формой записи уравнения (1).

В диссертационной работе показано, что построенная математическая модель в виде (5) удовлетворяет свойствам вышеуказанной физической модели со свойствами 1-3.

В четвёртой главе даётся описание математической модели нестационарных колебаний маятниковых гасителей торсионно-демпферного типа и выполнен сравнительный анализ эффективности энергорассеяния. На рис. 6 показана расчётная схема с указанием моментов взаимодействия составных частей гасителя.

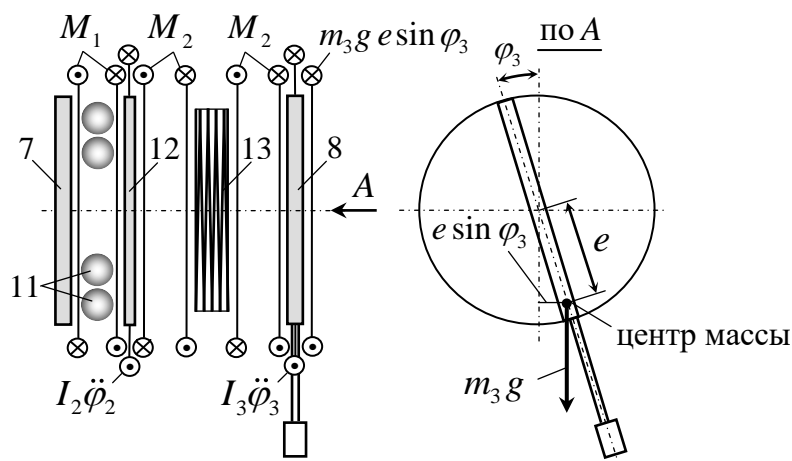


Рис. 6.

На рис. 6 через φ_1 , φ_2 , φ_3 обозначены углы поворотов соответственно ведущего и ведомого дисков, а также маятника, которые отсчитываются от вертикали против часовой стрелки. Момент $M_1 = M_1(\varphi_2 - \varphi_1)$ порождается в результате взаимодействия ведущего 7 и ведомого 12 дисков через систему элементов демпфирования 11. Момент M_2 возникает вследствие скручивания упругого элемента 13. Считается, что этот момент пропорционален углу $\varphi_3 - \varphi_2$. Тогда по закону Гука $M_2 = (\varphi_3 - \varphi_2)(GJ_t/l)$, где GJ_t – крутильная жесткость упругого элемента, l – его длина.

При вращении дисков возникают также инерционные моменты $I_2\ddot{\varphi}_2$ и $I_3\ddot{\varphi}_3$, где I_2 и I_3 – моменты инерции дисков 12 и 8.

Для моделирования гистерезиса и оценки эффективности энергорассеяния TDD задаётся движение ведущего диска по гармоническому закону: $\varphi_1(t) = \Phi \sin \Omega t$, где Φ и $\Omega = \dot{\varphi}_1$ – амплитуда, и круговая частота вынужденных гармонических колебаний; если f – частота, выражаемая в герцах, то $\Omega = 2\pi f$.

В итоге уравнения колебаний записываются с учётом (5) в виде:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} &= \omega, \quad \dot{\varphi}_2 = \omega_2, \quad \dot{\varphi}_3 = \omega_3, \\ I_2 \dot{\omega}_2 &= M_2 - M, \quad I_3 \dot{\omega}_3 = -M_2 - m_3 g e \sin \varphi_3, \\ \dot{M} &= \frac{\omega}{2} \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^2 \left[1 + \operatorname{sgn} \omega + (1 - \operatorname{sgn} \omega)(-1)^{i+j} \right] C_{ij} \varphi^{i-1} M_1^{j-1}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $M_2 = (GJ_t/l)(\varphi_3 - \varphi_2)$, $\varphi = \varphi_2 - \Phi \sin(2\pi ft)$. Система (6) интегрируются численно при начальных условиях

$$\varphi_2(0) = \varphi_3(0) = 0, \quad \dot{\varphi}_2(0) = \dot{\varphi}_3(0) = 0. \quad (7)$$

Эффективность гасителей оценивается по мощности диссипации энергии

$$W = \frac{1}{t} \int_t M d\varphi = \frac{1}{t} \int_t M \dot{\varphi} dt. \quad (8)$$

Дифференцирование (8) по t даёт $t\dot{W} + W = M_1\dot{\varphi}$, откуда следует уравнение

$$\dot{W} = \frac{1}{t}(M\dot{\varphi} - W), \quad (9)$$

которое удобно интегрировать по времени совместно с (6).

Решение (9) имеет горизонтальную асимптоту, соответствующую мощности рассеяния установившихся вынужденных колебаний.

В главе представлены также результаты сравнительного анализа эффективности двух вариантов гасителей TDD, показанных на рис. 7. По характеру их функционирования они названы инерционным (**I**) и гравитационным (**G**). В качестве примера на рис. 8, 9 показаны гистерезисные и временные зависимости $M(\varphi)$, $\varphi(t)$ при амплитуде внешнего гармонического возмущения $\Phi = 0.3$ рад. и частотах $f = 0.2$ Гц., $f = 0.8$ Гц соответственно.

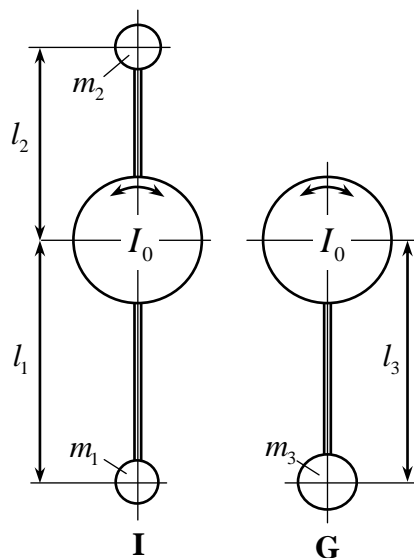


Рис. 7.

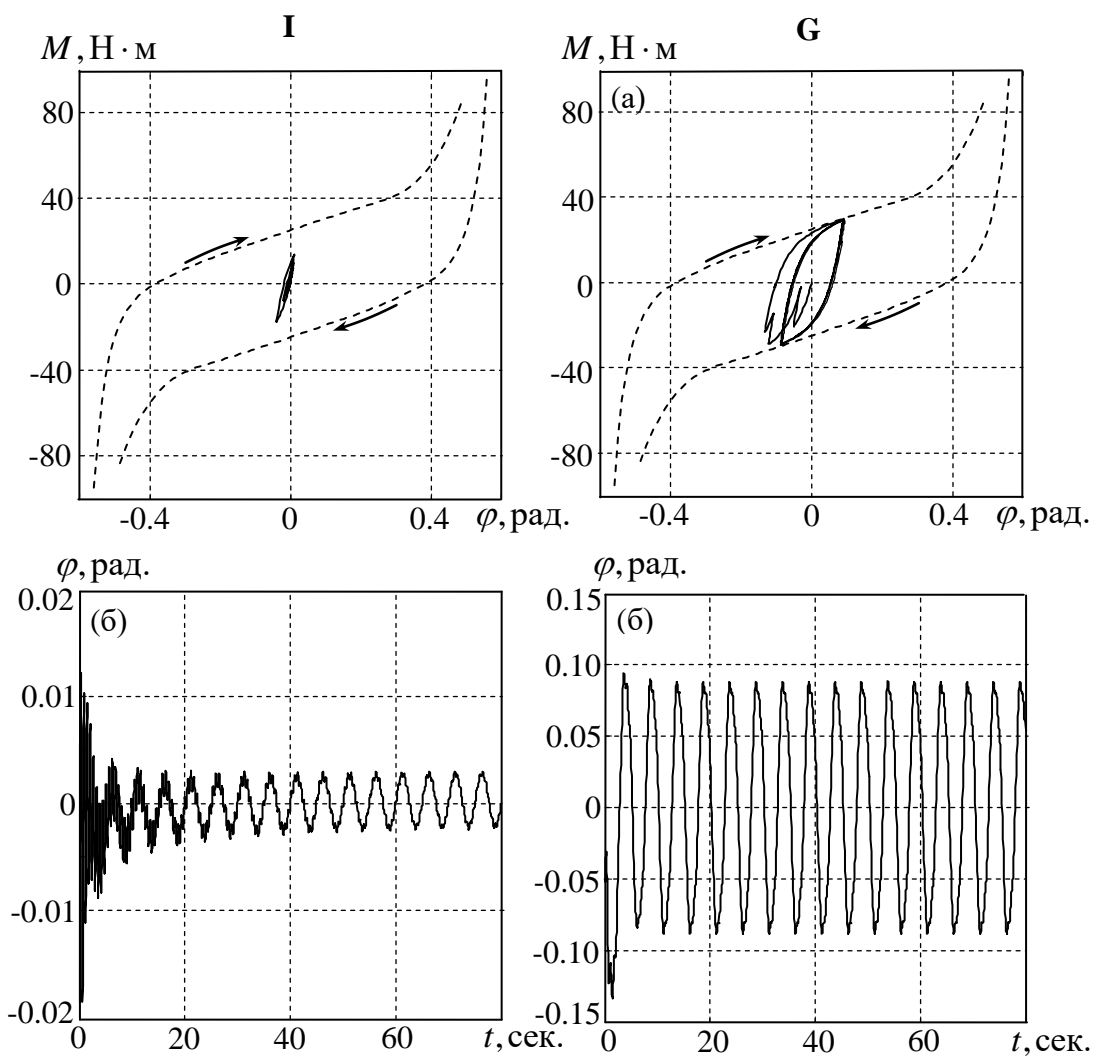


Рис. 8.

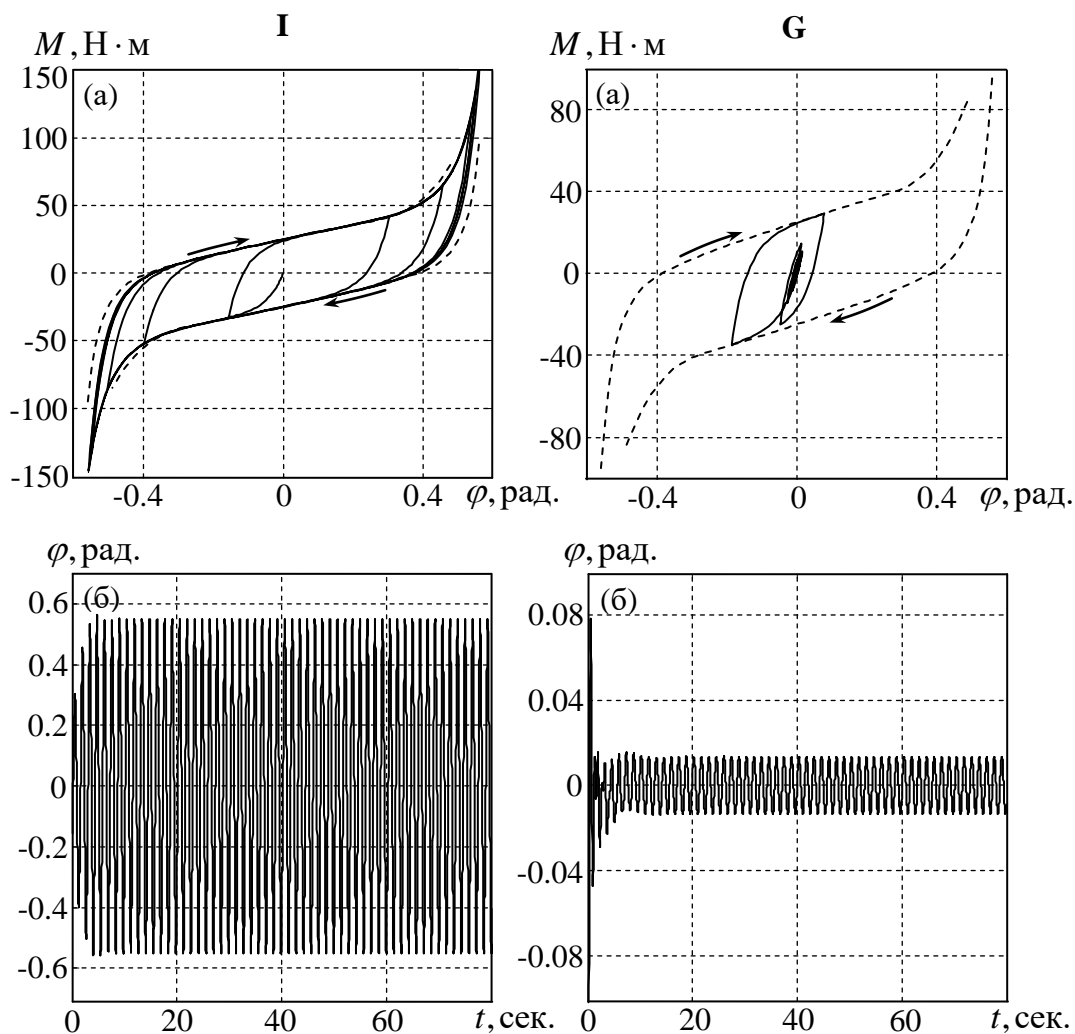


Рис. 9.

Расчёты мощности диссипации энергии W установившихся колебаний при различных значениях частот f позволили построить зависимости $W(f)$. Они показаны на рис. 10 (а), откуда видно, что G-гаситель эффективнее I-гасителя в начальном частотном диапазоне до ~ 0.5 Hz. Однако мощность G-гасителя в этом диапазоне не превышает 1 W, что говорит о малой эффективности обоих вариантов. В частотном диапазоне от 0.65 до 0.85 Hz энергорассеяние у I-гасителя существенно больше, чем у G-гасителя. При частотах до 0.75 Hz G-гаситель практически не работоспособен, тогда как энергорассеяние I-гасителя в окрестности 0.75 Hz составляет около 40 W. После 1 Hz мощности диссипации энергии колебаний I- и G-гасителей практически сравниваются. Таким образом, можно считать, что I-гаситель эффективен в

частотном диапазоне $0.65 < f < 0.85$ Гц, который характерен для начала возникновения пляски проводов.

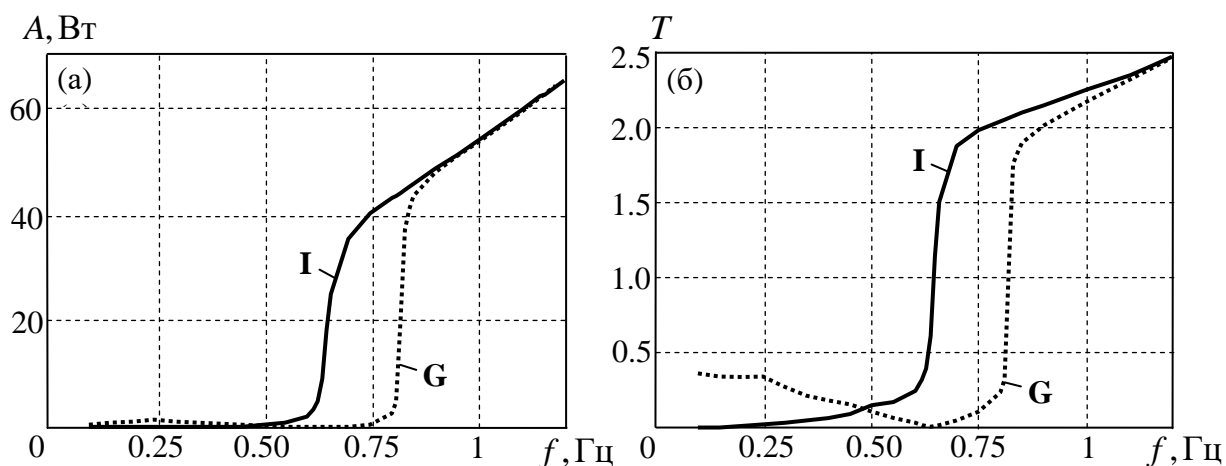


Рис. 10.

Полученные выводы более наглядно демонстрирует рис. 10 (б), где показана зависимость передаточной функции T от частоты f вынужденных гармонических колебаний ведущего диска. Под передаточной функцией понимается отношение амплитуды колебаний маятника относительно ведущего диска (или опорной рамы) к амплитуде гармонических колебаний ведущего диска. Из графика видно, что в окрестности частоты 0.65 Гц амплитуды колебаний ведущего и ведомого дисков I-гасителя сравниваются, тогда, как для G-гасителя ведомый диск колеблется практически синхронно с колебаниями ведущего диска.

В пятой главе на основе кинематического подхода моделируется динамика нестационарных колебаний системы «реовискозиметр – электрореологическая среда». Математическое описание динамического поведения такого рода диссипативных систем представляет фундаментальный научный интерес. Электрореологические среды относятся к «умным материалам» и их уникальные свойства открывают широкие перспективы применения (в устройствах демпфирования колебаний, различных механизмах стабилизации и управления движением подвижных аппаратов и т.п.), реологические и механические свойства которых (вязкость, предел текучести, модуль сдвига, и др.) могут резко изменяться под воздействием внешнего электрического

поля. Среда при наложении электрического поля, от маловязкой и жидкотекучей субстанции способна проявлять свойства вязкопластичного объекта.

В экспериментах в качестве дисперсной фазы использовались полиимиды, которые обладают комплексом уникальных свойств: высокой термической, криогенной, радиационной стойкостью, огнестойкостью, отличными прочностными показателями в большом температурном диапазоне. Это обеспечивает им широкое применение в высокотехнологичных областях, таких как аэрокосмический комплекс, атомная энергетика, транспортное машиностроение, электроника, электротехника и т.д.

В исследованиях использовали реовискозиметр Rheostress RS 150 (НААКЕ Германия) с измерительным электрореологическим узлом (приставкой) вида «плоскость-плоскость». Измерительный узел представляет собой конструкцию, содержащую два электрода из нержавеющей стали. Образцы испытывались в статическом и динамическом режимах с использованием узла «плоскость-плоскость». Диаметр рабочей поверхности ротора $2R = 35$ мм, зазор $h = 1$ мм. Измерения проводились при напряжениях 2.5 кВ и 3.5 кВ и в его отсутствии. В статическом режиме образцы испытывались при постоянной скорости сдвига равной 27 с^{-1} и 12 с^{-1} и при увеличении скорости сдвига от 10 до 200 с^{-1} .

Для математического моделирования кривых течения при нестационарном циклическом внешнем воздействии использовалась кинематическая модель, описанная в третьей главе диссертации. Аналогично (2) используется обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка вида

$$\frac{d\tau}{d\dot{\gamma}} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m C_{ij} \dot{\gamma}^{i-1} \tau^{j-1}, \quad (11)$$

где $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, τ – напряжение сдвига; коэффициенты C_{ij} определяются методами приближения, минимизируя невязку аналитического представления $d\tau/d\dot{\gamma}$ в виде правой части (11) к множеству значений $d\tau/d\dot{\gamma}$, полученных из экспериментов для предельного цикла. Числа k и m подбираются в результате простых численных экспериментов. Значения этих парамет-

ров определяют характер (скорость) асимптотического приближения решения с начальной точкой $(\dot{\gamma}_0, \tau_0)$ во внутренней или внешней окрестностях гистерезиса к кривой предельного цикла.

В опытах было выполнено около 11 циклов «нагрузки» и «разгрузки» электрореологических суспензий для нескольких значений напряженности внешнего электрического поля E . Ниже приводятся результаты экспериментов для значения $E = 2.5$ кВ: были получены 22 массива экспериментальных данных, каждый из которых состоял примерно из 200 пар значений $(\dot{\gamma}_i, \tau_i)$. Сравнительный анализ данных показал, что кривые течения циклов, начиная с 9, близки к соответствующим кривым 8 цикла. Это свидетельствовало о стабилизации процесса и позволило ограничиться первыми 8 циклами для моделирования реологического процесса.

На рис. 11 в качестве примера изображены вместе кривые «нагрузки» и «разгрузки» для всех циклов, полученных в результате экспериментальных исследований. Кривые «нагрузки» и «разгрузки» изображены соответственно сплошными и пунктирными линиями. Из графиков видна нестыковка кривых «нагрузки» и «разгрузки» для каждого и соседних циклов. Это свидетельствует об инструментальных погрешностях и несовершенстве экспериментальной технологии. Однако предложенная аналитическая технология позволяет построить модель непрерывного процесса. Для этого достаточно определить интервалы изменений скорости сдвига в соответствии с опытными данными и воспользоваться предложенной методологией на основе интегрирования уравнения (11). Результаты представлены на рис.12, где кривые «нагрузки» показаны сплошными линиями, кривые «разгрузки» – пунктирными.

Уравнение (11) может быть введено в общую систему уравнений, описывающих динамику механической системы с жидкими средами со сложными реологическими свойствами. Для этого оно преобразуется согласно (3)-(5) к виду

$$\frac{d\tau}{dt} - \frac{d^2\gamma}{dt^2} \cdot \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m C_{ij} \dot{\gamma}^{i-1} \tau^{j-1} = 0. \quad (12)$$

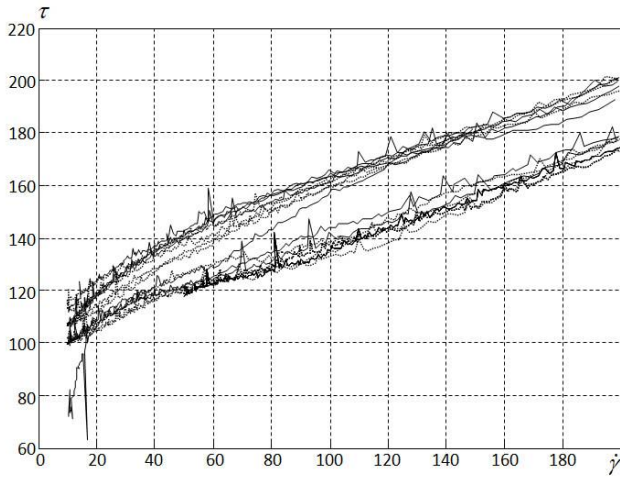


Рис. 11.

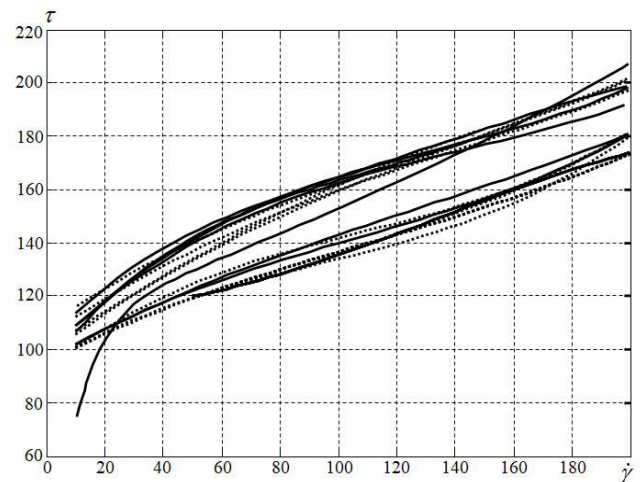


Рис. 12.

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы.

1. Проведены экспериментальные исследования гистерезисных процессов двух диссипативных систем – маятникового гасителя торсионно-демпферного типа и механической системы «реовискозиметр – электрореологическая среда», которые легли в основу формулировок двух феноменологических моделей гистерезиса.

2. Дана формулировка феноменологической модели гистерезиса с использованием опорных или «скелетных» кривых нагружения, которые используются в качестве криволинейной координатной сетки, позволяющей моделировать траекторию между кривыми «нагрузки-разгрузки» цикла установившихся колебаний с максимальной амплитудой.

3. Дана формулировка феноменологической модели гистерезиса на основе обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка с правой частью в виде полинома от двух переменных – параметра гистерезисного процесса, зависящего от времени, и функции этого параметра с идентификацией полиномиальных коэффициентов по экспериментальным данным для объемлющего цикла установившихся колебаний.

4. Разработана математическая модель нелинейных колебаний маятникового гасителя торсионно-демпферного типа, на основе которой построен и реализован алгоритм для анализа эффективности и оптимизации конструкций маятниковых гасителей с гистерезисом энергорассеяния.

5. Получены решения задач о нестационарных колебаниях двух диссипативных систем с гистерезисом энергорассеяния – маятникового гасителя торсионно-демпферного типа и механической системы «реовискозиметр – электрореологическая среда», для которых выполнены экспериментальные исследования с целью идентификации параметров математических моделей гистерезиса

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК.

1. Данилин А.Н., Курдюмов Н.Н., Тарасов С.С., Шалашилин А.Д. Моделирование гистерезиса энергорассеяния на примере колебаний гасителя пляски проводов ЛЭП // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – Вып. 6. – С.110-118.

2. Данилин А.Н., Яновский Ю.Г., Семёнов Н.А., Шалашилин А.Д. Кинематическая модель реологического поведения неньютоновских жидкостей в условиях нестационарного циклического нагружения // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2012. – Т.18. – № 3. – С.369-383.

Публикации в изданиях, цитируемых интернет-платформой Web of Science.

3. Danilin A.N., Shalashilin A.D. Hysteresis modelling of mechanical systems at nonstationary vibrations // Mathematical Problems in Engineering. – Vol.2018. – Article ID 7102796. – 15 p.; doi:10.1155/2018/7102796.

4. Danilin A.N., Yanovsky Yu.G., Semenov N.A., Shalashilin A.D. Kinematic model of the rheological behavior of non-Newtonian fluids in conditions of nonstationary cyclic loading // Composites: Mechanics, Computations, Applications: An

Публикации в других изданиях.

5. Данилин А.Н., Козлов К.С., Кузнецова Е.Л., Шалашилин А.Д. Моделирование колебаний гасителей Стокбриджа с учётом гистерезиса энергорассеяния // Материалы XVIII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2013), 22-31 мая 2013 г., Алушта – М.: Изд-во МАИ, 2013. – С. 326-328.

6. Шалашилин А.Д., Семенов Н.А., Яновский Ю.Г. Экспериментальное исследование реологических свойств магнитоуправляемых сред в условиях циклических нагрузок и их кинематическое моделирование // «Механика наноструктурированных материалов и систем». Тезисы докладов 2-й Всероссийской научной конференции. Москва, 17 декабря – 19 декабря 2013 г. – Москва, ИПРИМ РАН. 2013. – С. 78.

7. Шалашилин А.Д., Семенов Н.А., Данилин А.Н. Исследование магнито-реологических свойств суспензий на основе магнетита в условиях нестационарного циклического нагружения // Тезисы докладов IV-го Всероссийского симпозиума «Механика композиционных материалов и конструкций», 4–6 декабря 2012 г. Изд-во ИПРИМ РАН, Москва. – С.83-84.

8. Юмашев О.Б., Шалашилин А.Д., Гусева М.А., Густова Т.А. Исследование магнитных свойств магнетита, полученного различными способами, в зависимости от изменения температуры // Тезисы докладов Всероссийской конференции «Механика наноструктурированных материалов и систем», 13–15 декабря 2011 г. Изд-во ИПРИМ РАН: Москва. – С. 59.

9. Данилин А.Н., Семенов Н.А., Шалашилин А.Д., Яновский Ю.Г., Юмашев О.Б., Карандин В.И., Рожков А.Г. Сравнительный анализ реологических свойств биологических жидкостей человека в норме и патологии // Тезисы докладов Всероссийской конференции «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред», 23–25 ноября 2010 г. Изд-во ИПРИМ РАН: Москва, 2010. – С.61.