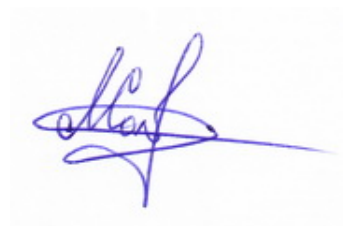


На правах рукописи



Соловьёв Андрей Михайлович

**МОДЕЛИ ДИНАМИКИ НЕУСТОЙЧИВЫХ
МЕХАНИЧЕСКИХ И НЕЙРОННЫХ СИСТЕМ С
ГИСТЕРЕЗИСНЫМИ СВЯЗЯМИ**

Специальность: 05.13.18 — математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Воронеж 2017

Работа выполнена на кафедре цифровых технологий ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор **Семёнов Михаил Евгеньевич**

Официальные оппоненты: **Соболев Владимир Андреевич**, доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва», механико-математический факультет, кафедра дифференциальных уравнений и теории управления, заведующий

Тихомиров Сергей Германович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», факультет управления и информатики в технологических системах, кафедра информационных и управляющих систем, профессор

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Защита диссертации состоится «6» сентября 2017 года в 15 ч. 10 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.038.20 ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» по адресу: 394018, Воронеж, Университетская пл., 1, ауд. 335.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» по адресу: 394018, Воронеж, Университетская пл., 1, а также на сайте http://www.science.vsu.ru/dissertations/4674/Диссертация_Соловьев_А.М..pdf

Автореферат разослан «28» июня 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.038.20, кандидат физико-математических наук, доцент

Шабров С.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Нелинейные зависимости гистерезисного типа повсеместно возникают в различных разделах физики, механики, биологии и др. Известен целый ряд физических явлений, закон изменения которых представляет собой замкнутую кривую, называемую петлей гистерезиса. Отметим наиболее известные из них: диэлектрический гистерезис (кривая поляризации $P = f(E)$), магнитный гистерезис (кривая намагничивания $B = f(H)$), упругий гистерезис (кривая деформации $\varepsilon = f(F)$) и некоторые другие.

Несмотря на распространенность и важность этого явления, до недавнего времени не существовало простого аналитического выражения, способного описать его с достаточной степенью точности и адекватности. Важным шагом к систематизированному описанию явления гистерезиса стало создание М.А. Красносельским и А.В. Покровским математической теории, формализующей общие методы описания и исследования широких классов систем с гистерезисом. Для этого был создан и развит новый математический аппарат, основанный на выделении элементарных носителей гистерезиса – гистеронов, трактуемых как преобразователи с пространствами состояний, соответствиями вход-выход и вход-состояние. Развиваемые в рамках теории методы описания гистерезиса связаны с известной методологией Нола, Колемана, Труделла и др. (отметим в этой связи шестую проблему Гильберта в механике сплошных сред).

Развитый в этой теории математический аппарат удобен для исследования процессов в замкнутых системах, содержащих звенья с гистерезисом. Он позволяет применять современные функционально-аналитические и функционально-топологические методы в таких задачах, как анализ устойчивости и абсолютной устойчивости вынужденных периодических колебаний и автоколебаний, исследование роли малых параметров и построение усредненных уравнений, анализ численных схем, выделение особых режимов функционирования и изучение их свойств и т.д.

Системы с гистерезисными нелинейностями обладают рядом специфических особенностей коренным образом отличающих их от традиционных систем с функциональными нелинейностями. К их числу, в первую очередь, относятся недифференцируемость гистерезисных операторов, необычность фазовых пространств, включающих в себя пространства состояний соответствующих гистерезисных преобразователей, в общем случае не обладающих линейной структурой и некоторые другие. Следовательно, анализ и синтез моделей оптимального функционирования систем с гистерезисными нелинейностями требует разработки новых методов, учитывающих упомянутые выше особенности. Кроме того, как показывают простые примеры, для систем с гистерезисом типична ситуация, когда в них принципиально нереализуемы асимптотически устойчивые режимы, что затрудняет численную реализацию методов их приближенного построения. Это обуславливает необходимость разработки новых численных методов и алгоритмов построения переходных процессов в системах с гистерезисными нелинейностями. Таким образом, актуальной является задача развития качественных и приближенных аналитических методов исследования стабилизации и оптимального функционирования систем с гистерезисными нелинейностями, а также разработки алгоритма приближенного построения их решений.

Еще одной областью, где возникают явления гистерезисной природы,

является нейрофизиология. Гистерезисные эффекты проявляются в функционировании нейронов на различных уровнях, в том числе они играют ключевую роль в работе кратко- и долговременной памяти. Учет гистерезисной природы нейронов естественным образом повышает эффективность применения нейронных сетей для решения прикладных задач, таких как задача распознавания образов и выделение заданных паттернов изображений из общего потока видеоданных. В эффективности выделения важных объектов из огромного зрительного потока информации эталоном является человеческий мозг, поэтому для разработки систем распознавания образов естественно использовать модели биологических нейронных сетей с присутствующими им гистерезисными свойствами. Модели биологических нейронов были достаточно подробно исследованы, однако гистерезисные эффекты в моделях биологических нейронов к настоящему времени не нашли должного освещения. Поэтому задача, связанная с анализом новых математических методов моделирования биологических нейронных сетей с гистерезисными свойствами является важной и актуальной.

Диссертационная работа выполнена в рамках научного направления кафедры Цифровых технологий Воронежского государственного университета и частично поддержана РФФИ (гранты № 13-08-00532, № 16-08-00312, № 17-01-00251). Программное обеспечение созданное в рамках данной работы получило свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ (№ 2016612458 и № 2016612469).

Цель работы. Разработка и развитие качественных и приближенных аналитических методов, численных алгоритмов анализа оптимального функционирования, стабилизации и синхронизации для классов механических систем и искусственных нейронных сетей с гистерезисными связями.

Достижение указанной цели осуществлялось решением следующих задач:

1. Анализ математических моделей гистерезиса. Разработка принципов построения их численной реализации в составе различных систем с гистерезисными связями.
2. Разработка принципов построения функций активации нейронов искусственной нейронной сети с наличием гистерезиса. Построение искусственных нейронных сетей с гистерезисными свойствами, исследование законов и динамики их функционирования.
3. Анализ математической модели обратного гибкого маятника с гистерезисными связями в основании его крепления. Разработка методов стабилизации маятника в окрестности вертикального положения. Решение задачи оптимизации по параметрам управляющего воздействия.
4. Исследование математической модели механической системы с демпфирующим звеном гистерезисной природы, находящейся под воздействием периодической внешней силы. Разработка алгоритма численного анализа гистерезисного демпфера.

Объекты исследования — механические системы и искусственные нейронные сети с носителями гистерезисных свойств.

Предмет исследования — математические модели систем с гистерезисом, алгоритмы, программные методы стабилизации и оптимизации, численные и аналитические методы построения оптимальных переходных процессов в системах с гистерезисом.

Методы исследования. При выполнении работы использовались методы математического моделирования, операторная теория гистерезиса, качественная теория дифференциальных уравнений, теория автоматического регулирования, нелинейный анализ, численные методы решения дифференциальных уравнений с запаздыванием.

Научная новизна. В работе получены следующие новые результаты:

- разработаны принципы построения искусственных нейронных сетей с гистерезисной функцией активации, проведено исследование переходных процессов отдельных нейронов, установлены повышенная помехоустойчивость и наличие ассоциативной памяти для классов задач распознавания образов;
- разработан алгоритм стабилизации обратного гибкого маятника, предложен метод оптимизации параметров управляющего воздействия на основе адаптивного поискового поведения анимата в задаче стабилизации обратного гибкого маятника с гистерезисным управлением;
- проведено исследование математической модели гистерезисного вибрационного демпфера на основе материала Ишлинского, выполнен сравнительный анализ гистерезисного и вязкого демпферов.

Область исследований. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические науки). Область исследования соответствует п.1 «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений», п.2 «Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей», п.5 «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента».

Практическая значимость работы. Разработанная в диссертационной работе модель искусственной нейронной сети с гистерезисной функцией активации повышает эффективность работы программного обеспечения для распознавания и классификации отдельных классов объектов, а также может служить основой для разработки эффективных алгоритмов обработки видеопотока в реальном времени. Предложенные методы стабилизации обратного гибкого маятника с гистерезисным управлением могут послужить основой для программно-аппаратной реализации устойчивого функционирования различных механических систем с гистерезисными связями. Результаты в области исследования модели гистерезисного демпфера на основе материала Ишлинского могут стать основой для создания эффективных демпфирующих устройств, которые, в свою очередь, могут найти применение при строительстве зданий в сейсмически активных районах, автомобилестроении, тяжелой промышленности.

На защиту выносятся:

- методика построения искусственных нейронных сетей с гистерезисной функцией активации;
- численная реализация и анализ математической модели обратного гибкого маятника с гистерезисными связями в основании его крепления, методика оптимизации его динамики (на основе бионического алгоритма);
- алгоритм исследования динамики механических систем с гистерезисным вибрационным демпфером на основе материала Ишлинского.

Личный вклад автора. Все результаты представленной работы получены лично автором.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации» (XXI Международный научно-технический семинар, г. Алушта, сентябрь 2012г.), «Информатизация процессов формирования открытых систем на основе САПР, АСНИ, СУБД и систем искусственного интеллекта» (ИНФОС-2013, 7-я международная научно-техническая конференция, г. Волгоград, 2013г.), «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации» (XXII международный научно-практический семинар, г. Алушта, сентябрь 2013г.), «Нейроинформатика-2014» (XVI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием, г. Москва, январь 2014г.), «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации» (XXIII международный научно-практический семинар, г. Алушта, Сентябрь 2014г.), «Нейроинформатика-2015» (XVII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием, г. Москва, январь 2015г.), 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (Greece, Crete, May 2015), «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации» (XXIV международная научно-техническая конференция, г. Алушта, сентябрь 2015г.), «Информатика: проблемы, методология, технологии» (XVI международная конференция, г. Воронеж, февраль 2016г.), «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2016, Международная конференция и молодежная школа, г. Самара, май 2016г.), «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации» (XXV международная научно-техническая конференция, г. Алушта, сентябрь 2016г.), 3rd International Conference on Structural Nonlinear Dynamics and Diagnosis (Marrakech, May 2016).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 18 печатных работ в форме статей, тезисов и докладов [1-18]. Из них 3 в журналах перечня ВАК и 5 в журналах, включенных в международную реферативную базу данных Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 161 наименования. Общий объем диссертации составляет 124 страницы, включая 37 рисунков.

Краткое содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель работы и задачи исследования, показана её научная новизна, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проводится обзор литературы, посвященной тематике математических моделей гистерезиса и методам их описания, а также искусственным нейронным сетям, принципам их построения и особенностям их функционирования.

Во второй главе на основе методов системного анализа излагаются основные свойства используемых в работе гистерезисных преобразователей – люфта, упора, S -преобразователя, а также преобразователей Прейзаха и Ишлинского. Все носители гистерезисных свойств трактуются согласно М.А. Красносельскому и А.В. Покровскому как преобразователи, определенные на пространстве непрерывных функций, зависящих от своего начального состояния как от параметра, динамика которых описывается двумя соотношениями – вход-состояние и состояние-выход.

Третья глава посвящена искусственным нейронным сетям (ИНС) с гистерезисной функцией активации (ГФА). В данной главе описываются принципы построения однослойной и двухслойной ИНС с ГФА на основе S -преобразователя и модели Прейсаха, а также предлагаются методы обучения таких нейросетей.

Архитектура однослойной ИНС с ГФА приведена на рис. 1.

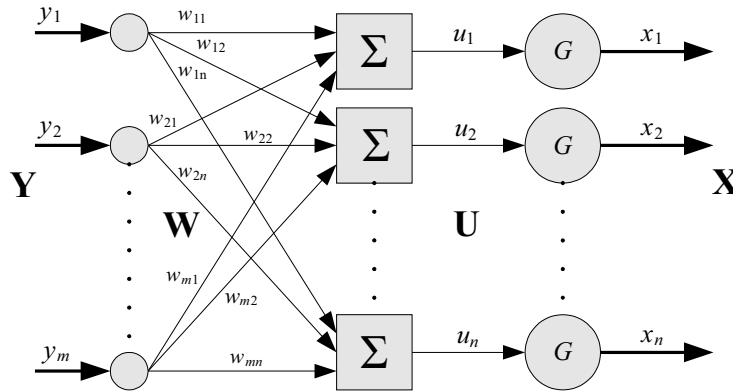


Рис. 1. Однослойная ИНС с ГФА.

Здесь Y^m – вектор входных значений; W^{mn} – матрица весовых коэффициентов; U^n – вектор воздействий; X^n – целевой вектор; $G = f(U, X, \dot{X}, t)$ – функция активации.

В случае использования в качестве гистерезисной функции активации G модели S -преобразователя, элементы целевого вектора X^n можно представить в виде конечных разностей:

$$\frac{x_k^{j+1} - x_k^j}{h} = u_k^j - \left(x_k^j\right)^3 + 3x_k^j, \quad k = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где h – шаг по времени, j – номер итерации. Задав начальные условия (u_k^0, x_k^0) и шаг h , можно найти текущее значение элементов целевого вектора $x_k^{(j+1)}$. В качестве ГФА можно также использовать преобразователь Прейсаха в виде конечномерной аппроксимации с заранее заданными параметрами.

Так как рассматриваемая ИНС является однослойной, для её обучения будем использовать дельта-правило, являющееся следствием первого и второго правил Хебба.

Архитектура двухслойной ИНС с ГФА приведена на рис. 2. Здесь Y^m – вектор входных значений; W^{mn} – матрица весовых коэффициентов скрытого слоя; U^n – вектор воздействий скрытого слоя; Q^n – выходной вектор скрытого слоя; V^{np} – матрица весовых коэффициентов выходного слоя; E^p – вектор воздействий выходного слоя; X^p – целевой вектор. Слой 1 будем называть скрытым, а слой 2 – выходным слоем.

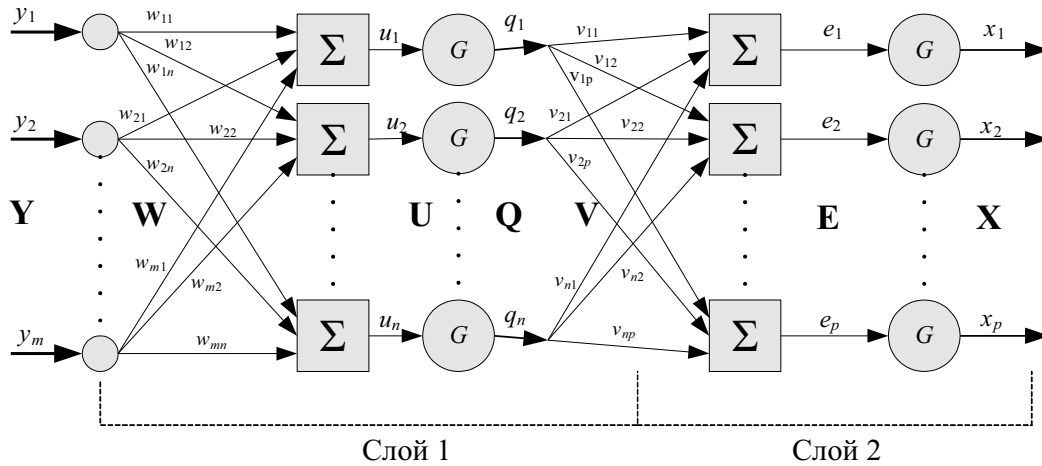


Рис. 2. Двухслойная ИНС с ГФА.

Обучение ИНС будем проводить с помощью процедуры обратного распространения ошибки. Таким образом, рассматриваемая ИНС можно классифицировать как сеть обратного распространения.

В качестве функции активации G можно использовать как модель на основе S -преобразователя, так и преобразователь Прейсаха. В случае применения модели Прейсаха функция активации каждого нейрона сети содержит n неидеальных реле $R[\alpha, \beta, x_0]$.

В данной главе также проводилось исследование функционирования ИНС с ГФА на примере решения задачи классификации образов (изображений чисел от 0 до 9). Результаты моделирования работы нейросети показаны на рис. 3 и 4.

Исследование динамики ИНС с ГФА показало, что такая нейросеть обладает большей помехоустойчивостью по сравнению с подобной ИНС построенной по стандартной схеме, а из анализа работы двухслойной ИНС с ГФА следует, что при обучении сети с помощью одинаково повторяющейся последовательности образов, сеть способна запоминать эту последовательность и в процессе работы реагировать на нее быстрее, чем на те же образы, поданные на вход в случайном порядке.

Таким образом, данная ИНС обладает не только способностью к распознаванию, но и способностью к выделению из набора подаваемых на нее образов искомой последовательности. Другими словами, двухслойная сеть обладает свойством ассоциативной памяти.

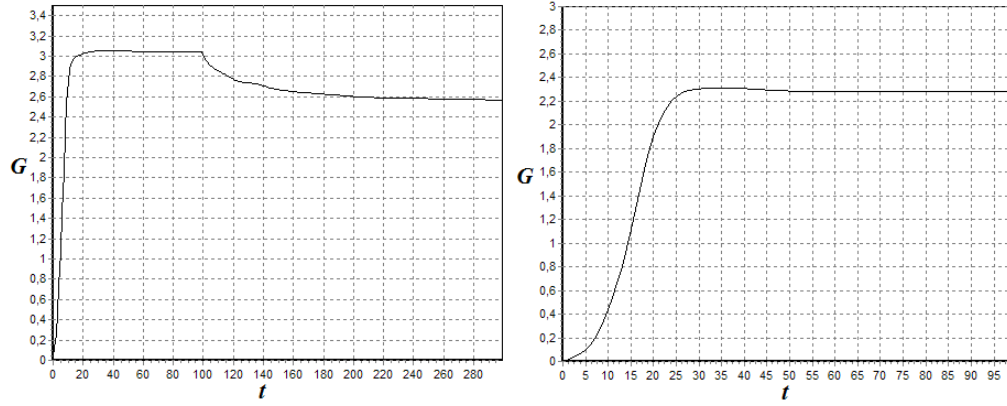


Рис. 3. Динамика нейрона с ГФА однослойной ИНС в случае подачи на вход последовательно идеального и зашумленного образа (слева) или только зашумленного образа (справа).

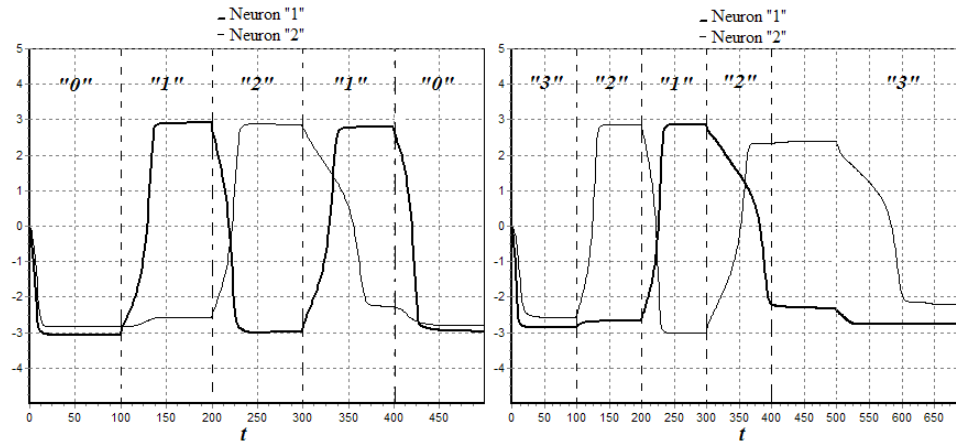


Рис. 4. Динамика двух соседних нейронов двухслойной ИНС с ГФА соответствующих символам «1» и «2» обученных на последовательности образов 0 – 9 (слева) и 9 – 0 (справа).

В четвертой главе исследуется математическая модель обратного гибкого маятника с люфтом в основании его крепления, предлагаются методы решения задачи стабилизации такого маятника в окрестности вертикального положения.

Физическая модель маятника представлена на рис. 5. Здесь (x, y) – система отсчета гибкого стержня массой m , длиной l и плотностью ρ , где ось Ox совпадает с касательной к профилю стержня в точке его крепления; θ – угол наклона системы координат стержня, I – осевой момент инерции сечения стержня; (X, \bar{x}) – инерциальная система отсчета рассматриваемой механической системы, M – масса цилиндра с раствором L , F – сила, приложенная к поршню массой m_p , трактуемая как управление.

Сила, приложенная к опоре стержня, описывается с помощью преобразователя - люфта следующим образом

$$f(t) = \Gamma[X(0, t), Y(t), L, F_0]F = \begin{cases} 0, & |X(0, t) - Y(t)| \leq L, \\ F, & |X(0, t) - Y(t)| > L, \end{cases} \quad (2)$$

где L – величина раствора цилиндра.

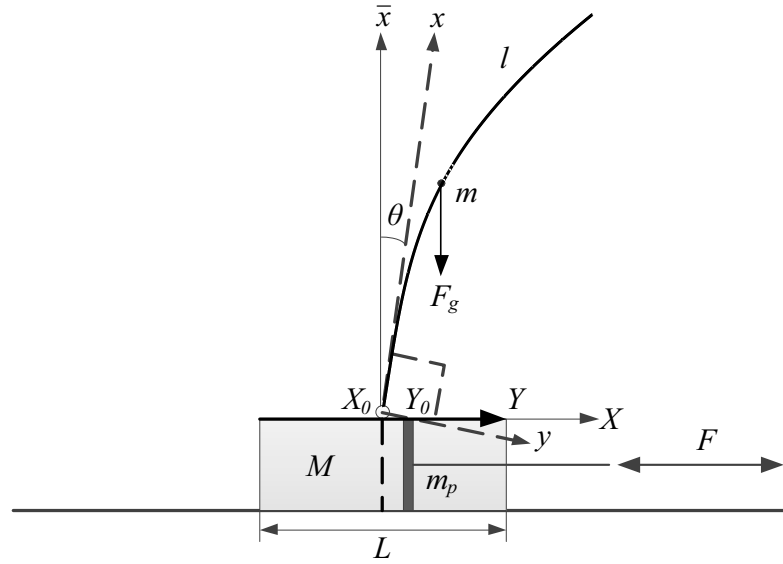


Рис. 5. Модель гибкого маятника.

Используя функцию Лагранжа и вариационный принцип, запишем систему уравнений, описывающую динамику представленной механической системы:

$$\begin{cases} \ddot{X}(\bar{x}, t) + \frac{EI}{\rho} X''''(\bar{x}, t) = gX'(0, t), \\ M\ddot{X}(0, t) + mgX'(0, t) + EIX''''(0, t) = f(t), \\ (M + m)\ddot{X}(0, t) + ml\ddot{X}'(0, t) = f(t), \\ g(M + m)\ddot{X}(0, t) - \frac{MEI}{\rho} X'''' = f(t)l, \\ f(t) = \Gamma[X(0, t), Y(t), \bar{L}, F_0]F, \\ m_p\ddot{Y}(t) = F, \end{cases} \quad (3)$$

Начальные условия, определяющие кривизну стержня:

$$\begin{cases} X(0, t) = X''(0, t) = 0, \\ X''(l, t) = X''''(l, t) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Управление маятником производится по принципу обратной связи, т.е. будем считать, что величина силы, приложенной к поршню (рис. 5), определяется следующим равенством:

$$F = k \cdot \text{sign}(ae_1 + e_2), \quad (5)$$

где коэффициенты $a > 0$, $k > 0$ и

$$\begin{cases} e_1 = \int_0^l X' dl, \\ e_2 = \int_0^l \dot{X}' dl. \end{cases} \quad (6)$$

Коэффициент e_1 – интегральный угол отклонения гибкого стержня, e_2 – интегральная угловая скорость.

Очевидно, что при данном методе управления число управляющих воздействий меньше числа степеней свободы обратного гибкого маятника,

а задача его стабилизации в окрестности вертикального положения будет заключаться в поиске оптимальных значений коэффициентов a и k , обеспечивающих наибольшую область притяжения и, как следствие, наилучшую стабилизацию.

Решение системы уравнений (3) выполнялось с помощью разработанных для этого разностных схем и метода кусочно-линейной аппроксимации. Учитывая тот факт, что решение производилось пошагово с применением численных методов, а также принимая во внимание недифференцируемость гистерезисных операторов, для оптимизации по параметрам управляющего воздействия (a, k) был использован бионический алгоритм адаптационного поискового поведения личинки ручейника (*Chaetopteryx villosa*).

Результаты численного моделирования стабилизации обратного гибкого маятника с гистерезисным управлением приведены на рис. 6, при этом слева демонстрируется поведение системы при коэффициентах a и k , полученных с помощью бионического алгоритма оптимизации, справа показано поведение системы в случае, когда коэффициенты управления отличны от рассчитанных, а величина люфта L увеличена.

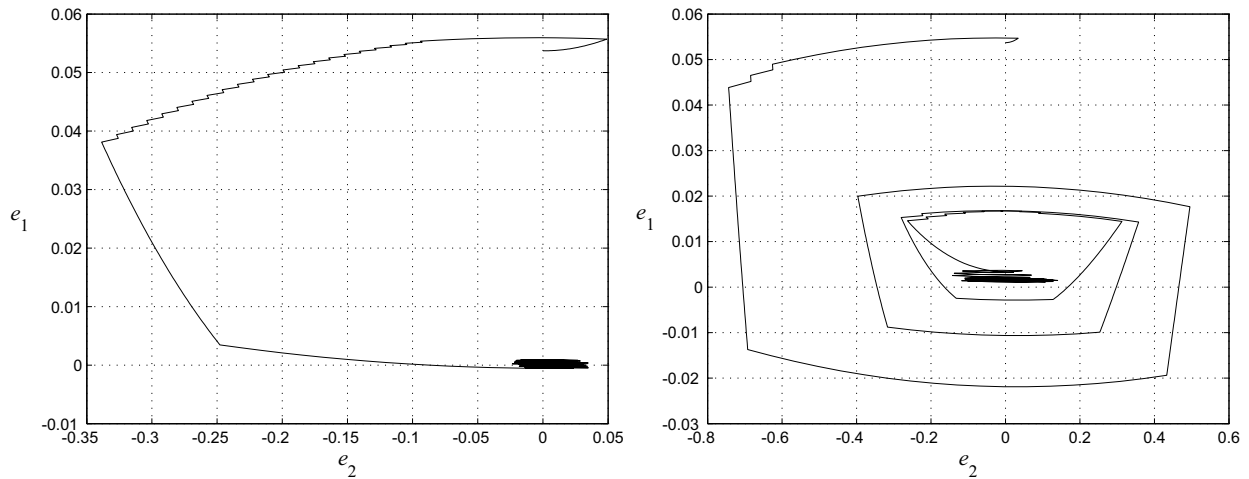


Рис. 6. Фазовая траектория системы с параметрами $L = 0.01$ м, $a = 8, 4$, $k = 1, 39$ (слева) и $L = 0.02$ м, $a = 15$, $k = 6$ (справа).

Как видно из рисунков, система успешно стабилизируется в окрестности вертикального положения, однако при коэффициентах, отличных от рассчитанных, требуется больше времени, чтобы привести маятник в вертикальное положение, что свидетельствует об оптимальности найденных параметров управления a и k .

В пятой главе диссертации выполняется построение математической модели механической системы с вынужденными колебаниями и демпфирующим звеном в качестве которого выступает вязкий и гистерезисный демпфер (рис. 7). В процессе компьютерного моделирования было проведено исследование динамики такой механической системы и выполнен сравнительный анализ эффективности линейного вязкого, нелинейного вязкого и гистерезисного демпферов колебаний.

Сила $f(t)$, приложенная к цилиндру M , изменяется по гармоническому закону:

$$f(t) = Y\omega^2 \sin(\omega t), \quad (7)$$

где Y – амплитуда, ω – частота воздействия.

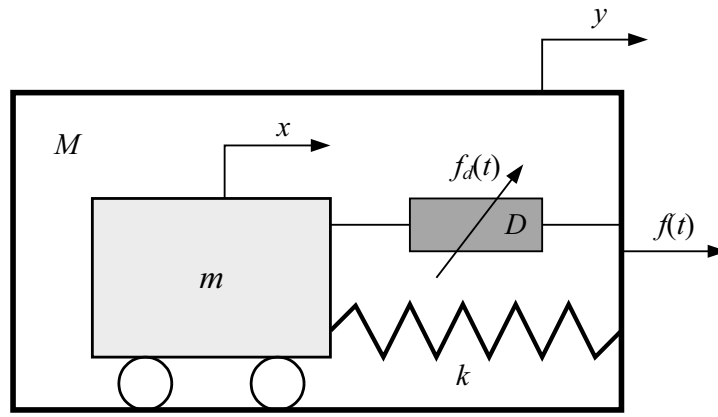


Рис. 7. Механическая система с вынужденными колебаниями и демпфирующим звеном.

В случае вязкого демпфирования, сила, приложенная к грузу m определяется как

$$f_d(t) = c(1 + z)^n \dot{z}, \quad n \geq 0, \quad (8)$$

где c – коэффициент демпфирования, $z = y - x$ – относительное перемещение, n – коэффициент, определяющий закон демпфирования. В случае, когда $n = 0$, D представляет собой линейный вязкий демпфер. Если $n > 0$, имеет место нелинейное демпфирование с нелинейностью n -го порядка.

В случае гистерезисного демпфирования:

$$f_d(\tau) = W[\tau, z_j(\tau)] u, \quad j = \overline{1, N}, \quad (9)$$

где W – преобразователь Ишлинского.

Введем следующие характеристики системы:

Передаточная функция силы, определяемая отношением силы, приложенной к цилиндру M и силы, приложенной к грузу m (рис. 7), отражает эффективность гашения внешнего воздействия по передаче силы от внешнего источника к грузу. Данная характеристика выражается следующим образом:

$$T_{ff} = \frac{\max \left| m \omega_0^2 \frac{d^2 x}{d\tau^2} \right|}{Y \omega^2}. \quad (10)$$

Передаточная функция «перемещение-сила», определяемая отношением перемещения груза m относительно цилиндра M и силы, приложенной к цилиндру, отражает эффективность гашения колебаний по способности демпфера уменьшать относительное перемещение груза под воздействием внешних сил. Данная характеристика выражается как

$$T_{fd} = \frac{\max |x(\tau)|}{Y \omega^2}. \quad (11)$$

Выполним моделирование динамики исследуемой механической системы численными методами. Построим график передаточной функции силы (10) и функции «перемещение-сила» (11) для случая вязкого демпфирования с параметром $n = \{0, 2, 4\}$ и гистерезисного демпфера на основе материала Ишлинского. Графики в частотной области приведены на рис. 8, где $\Omega = \omega/\omega_0$ – отношение частоты гармонического воздействия к собственной частоте системы.

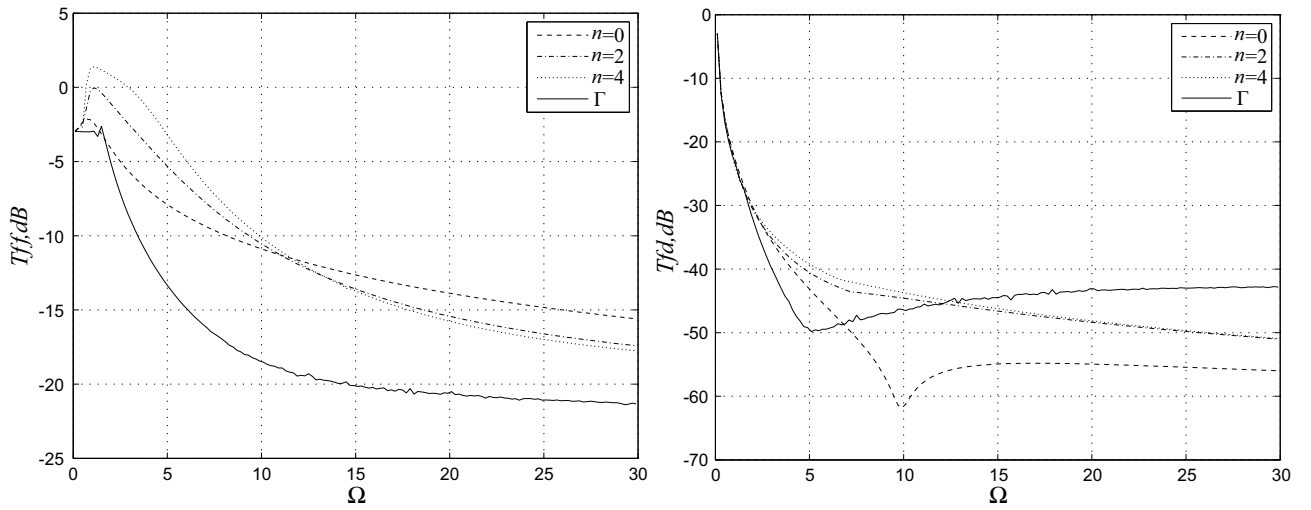


Рис. 8. Передаточная функция силы (слева) и Передаточная функция «перемещение-сила» (справа).

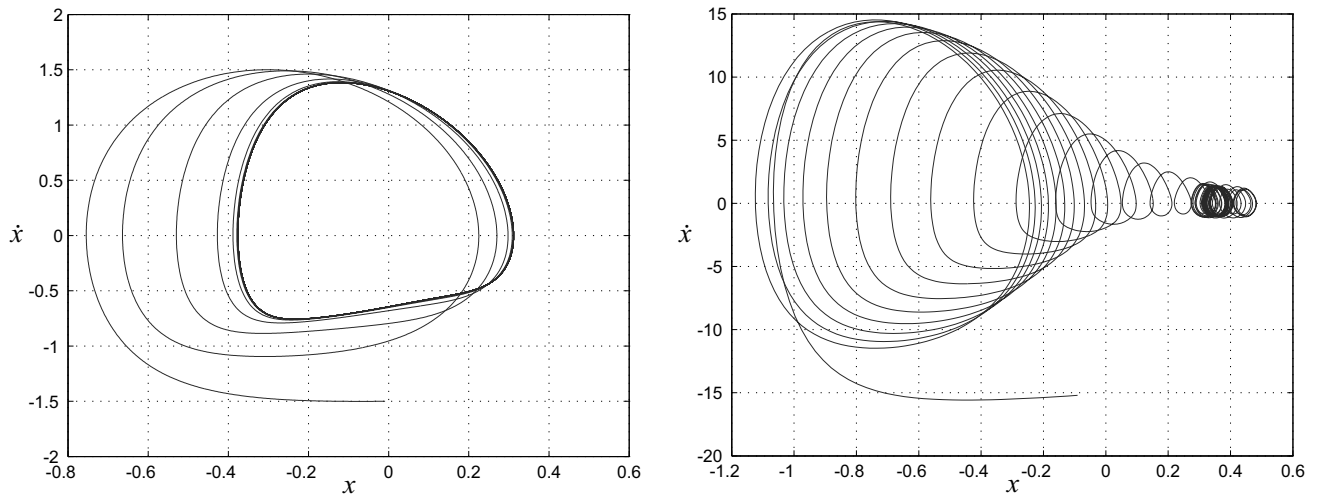


Рис. 9. Фазовый портрет для нелинейного вязкого демпфера при $n = 4$, $\Omega = 3$ (слева), $\Omega = 30$ (справа).

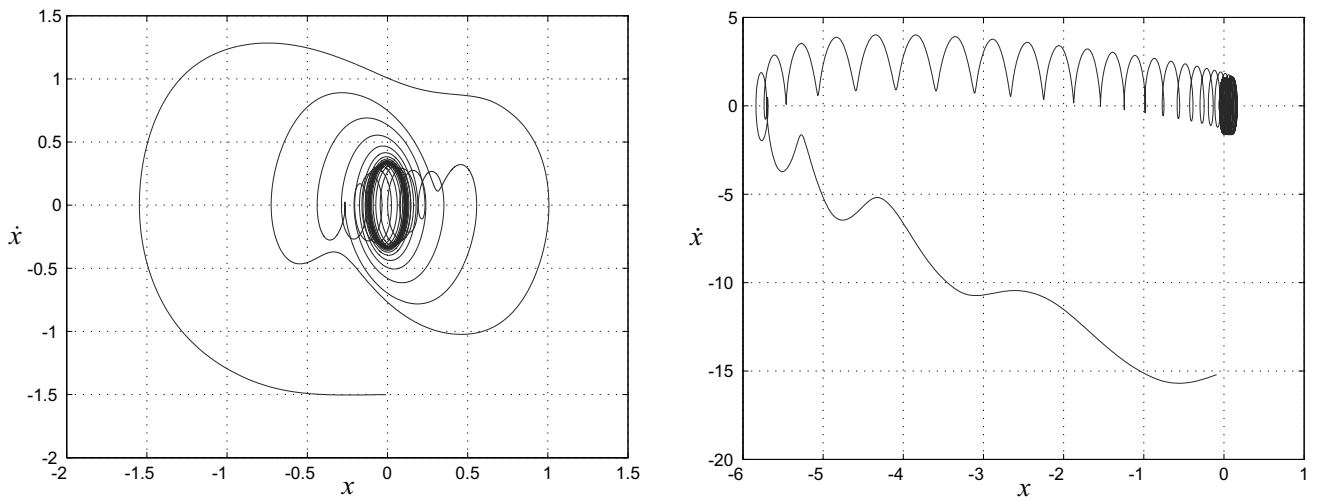


Рис. 10. Фазовый портрет для гистерезисного демпфера при $\Omega = 3$ (слева), $\Omega = 30$ (справа).

Графики фазовых траекторий для систем с нелинейным вязким и гистерезисным демпфированием в области резонанса и за её пределами показаны на рис. 9 и рис. 10.

Как видно из графиков, линейный вязкий демпфер имеет высокую эффективность в области резонанса системы, однако способность к демпфированию за пределами резонанса резко уменьшается. Нелинейное вязкое демпфирование имеет более широкую область эффективного использования, однако проигрывает в эффективности линейному демпферу в области резонанса системы.

Гистерезисный демпфер на основе материала Ишлинского имеет высокую эффективность как в области резонанса так и за ее пределами, тем самым выигрывая по эффективности демпфирования по сравнению с вязким демпфером. Недостатком гистерезисного демпфера можно считать снижение способности уменьшать относительное перемещение груза под воздействием внешних сил за пределами области резонанса системы.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты:

1. Выполнен анализ математических моделей гистерезиса, таких как S -преобразователь, модель Прейсаха, преобразователь-люфт, материал Ишлинского. Предложены принципы построения их численной реализации в составе различных систем с гистерезисными связями.
2. Разработаны принципы построения однослойной и двухслойной ИНС с ГФА на основе S -преобразователя и модели Прейсаха. Предложены алгоритмы их обучения. Было показано, что ИНС с ГФА обладает большей помехоустойчивостью по сравнению с подобной ИНС построенной по стандартной схеме. Анализ работы двухслойной ИНС с ГФА показал, что данная ИНС обладает свойством ассоциативной памяти.
3. Выполнен анализ математической модели обратного гибкого маятника с гистерезисными связями в основании его крепления. Разработаны принципы управления и стабилизации маятника в окрестности вертикального положения. Предложен метод оптимизации параметров управляющего воздействия на основе бионического алгоритма адаптивного поискового поведения анимата. Было показано, что данный алгоритм обладает значительным преимуществом перед классическими методами в случае решения задачи оптимизации для систем с гистерезисными связями.
4. Проведено исследование математической модели механической системы с демпфирующим звеном гистерезисной природы, находящейся под воздействием периодической внешней силы. Разработан алгоритм численного анализа гистерезисного демпфера. Выполнен сравнительный анализ эффективности вязкого и гистерезисного демпфирования. В процессе численного эксперимента было показано, что гистерезисное демпфирование, по сравнению с вязким, обладает рядом важных преимуществ.

Публикации автора по теме диссертации

Публикация в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

[1] Искусственные нейронные сети с гистерезисной функцией активации / А. М. Соловьёв, М. Е. Семёнов, М. Ю. Мишин, Е. Г. Кабулова // *Теория*

и техника радиосвязи.— 2013.— № 2.— С. 102.

[2] Искусственные нейронные сети с гистерезисной функцией активации на основе преобразователя Прейсаха / М. Е. Семёнов, А. М. Соловьёв, М. Г. Матвеев, О. И. Канищева // *Вестник ВГУ: Системный анализ и информационные технологии*. — 2013. — № 2. — С. 171.

[3] Соловьёв, А. М. Искусственная нейронная сеть с гистерезисной функцией активации: стабилизация неустойчивых объектов / А. М. Соловьёв, М. Е. Семёнов // *Теория и техника радиосвязи*. — 2016. — № 3. — С. 11.

Публикация в журналах из реферативной базы данных Scopus:

[4] *Semenov, M. E.* Elastic inverted pendulum with backlash in suspension: stabilization problem / M. E. Semenov, A. M. Solovyov, P. A. Meleshenko // *Nonlinear Dynamics*. — 2015. — Vol. 82. — Pp. 677–688.

[5] Hysteretic nonlinearity in inverted pendulum problem / M. E. Semenov, P. A. Meleshenko, A. M. Solovyov, A. M. Semenov // *Springer Proceedings in Physics: Structural Nonlinear Dynamics and Diagnosis*. — 2015. — Vol. 168. — Pp. 463–506.

[6] *Semenov, M. E.* Stabilization of elastic inverted pendulum with hysteresis / M. E. Semenov, A. M. Solovyov // *CEUR Workshop Proceedings*. — 2016. — Vol. 1638. — Pp. 650–657.

[7] Elastic inverted pendulum under hysteretic nonlinearity in suspension: Stabilization and optimal control / M. E. Semenov, A. M. Solovyov, A. M. Semenov et al. // *5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, COMPDYN 2015*. — Crete, Greece: 2015. — Pp. 2995–3003.

[8] Hysteretic damper based on the ishlinisky-prandtl model / M. E. Semenov, A. M. Solovyov, A. G. Rukavitsyn et al. // *3rd International Conference on Structural Nonlinear Dynamics and Diagnosis*.— Morocco, Marrakech: 2016.

Прочие журналы, материалы конференций, статьи в сборниках:

[9] Синхронизация нейронных ансамблей при помощи МПК / Д. В. Грачиков, М. Е. Семёнов, О. И. Канищева, А. М. Соловьёв // *Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации: труды XXI Международного научно-технического семинара*. — г. Алушта: 2012. — С. 85.

[10] Искусственные нейронные сети с гистерезисной функцией активации / А. М. Соловьёв, М. Е. Семёнов, М. Ю. Мишин, Е. Г. Кабулова // *Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации: труды XXII Международного научно-технического семинара*. — г. Алушта: 2013. — С. 127.

[11] Соловьёв, А. М. Однослойная искусственная нейронная сеть с гистерезисной функцией активации / А. М. Соловьёв, М. Е. Семёнов, Е. Г. Кабулова // *Информатизация процессов формирования открытых систем на основе САПР, АСНИ, СУБД и систем искусственного интеллекта (ИНФОС-2013). Материалы 7-ой международной научно-технической конференции*. — г. Волгоград: 2013. — С. 188–191.

[12] Соловьёв, А. М. Стабилизация обратного гибкого маятника с помощью искусственной нейронной сети с гистерезисной функцией активации / А. М. Соловьёв, М. Е. Семёнов // *Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации: труды XXIII между-*

- народного научно-практического семинара. — г. Алушта: 2014. — С. 84.
- [13] Соловьёв, А. М. Искусственные нейронные сети с гистерезисной функцией активации / А. М. Соловьёв, М. Е. Семёнов // *Нейроинформатика-2014. XVI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием. Сборник научных трудов.* — Т. 1. — г. Москва: 2014. — С. 31.
- [14] Соловьёв, А. М. Искусственная нейронная сеть с гистерезисными свойствами в задаче стабилизации обратного гибкого маятника с наличием люфта в основании его крепления / А. М. Соловьёв // *Нейроинформатика-2015. XVII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием. Сборник научных трудов.* — г. Москва: 2015.
- [15] *Semenov, M. E. Stabilization of elastic inverted pendulum with hysteresis / M. E. Semenov, A. M. Solovuyov // Международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии».* — г. Самара: 2016.
- [16] Соловьёв, А. М. Стабилизация обратных связанных маятников / А. М. Соловьёв, М. Е. Семёнов // *Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации: труды XXV международной научно-технической конференции.* — г. Алушта: 2016.
- [17] Соловьёв, А. М. Моделирование динамики гистерезисного демпфера колебаний / А. М. Соловьёв, М. Е. Семёнов // *Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации: труды XXIV международной научно-технической конференции.* — г. Алушта: 2015.
- [18] Соловьёв, А. М. Модель динамики гистерезисного демпфера / А. М. Соловьёв, М. Е. Семёнов, П. А. Мелешенко // *Сборник трудов XVI международной конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии».* — г. Воронеж: 2016. — С. 489–493.

Свидетельства о регистрации программных продуктов

- [1] Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2016612458.
- [2] Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2016612469.