

**АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ И СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СООРУЖЕНИЙ
им. М.Т.УРАЗБАЕВА**

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УЗБЕКИСТАНА
им. М.УЛУГБЕКА**

**На правах рукописи
УДК 534**

БУРАНОВ ХУДОЯР МАХМАДИЯРОВИЧ

**УСТОЙЧИВОСТЬ ВИБРОЗАЩИТНЫХ СИСТЕМ С
УПРУГОДЕМПФИРУЮЩИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ
ГИСТЕРЕЗИСНОГО ТИПА И ЖИДКОСТНЫМИ ЗВЕНЬЯМИ**

01.02.01 – Теоретическая механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Ташкент – 2010

Работа выполнена в Самаркандском государственном университете имени Алишера Навои

Научный руководитель - доктор физико-математических наук
Дусматов Олимжон Мусурмонович

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Тураев Хотам Тураевич

- доктор физико-математических наук
Атажанов Бахтиёр Хусанович

Ведущая организация - Андижанский государственный университет

Защита состоится «_____» _____ 2010 г. в _____ часов на заседании объединенного специализированного совета К.025.01.02 при Институте механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз и Национальном университете Узбекистана МВССО РУз по адресу: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 31. тел.: 262-71-32, 262-71-42, e-mail: instmech@uzsci.net

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института механики и сейсмостойкости сооружений

Автореферат разослан «_____» _____ 2010 г.

Ученый секретарь объединенного
специализированного совета
к.т.н.

Сагдиев Х.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена решению задач устойчивости нелинейных колебаний виброзащитных систем с упругодиссипативными элементами гистерезисного типа и жидкостными звеньями при гармонических и случайных воздействиях.

Актуальность работы. Математическое моделирование и исследование динамики и устойчивости, нелинейных виброзащитных систем являются одной из актуальных задач динамики механических систем. Эти задачи становятся важными с практической точки зрения, если учесть тот факт, что с ростом скоростей, мощности двигательных установок, машин, эксплуатируемых в современной технике, появляется нужда в сохранении их прочности, долговечности и работоспособности.

Область применения динамических гасителей колебаний весьма широка. Давно известно применение динамических гасителей колебаний в машиностроении, судостроении, авиастроении, в различных инженерных сооружениях – стальных дымовых трубах, башенных сооружениях, мостах, зданиях и др. Особенно надо отметить области, в которых динамические гасители выступают как самостоятельные средства борьбы с вибрациями. Во многих случаях гасители колебаний могут применяться в сочетании с другими виброзащитными средствами, совместно с виброизоляцией, сейсмоизоляцией, корректорами колебаний.

Кроме того, динамические гасители колебаний очень эффективны при подавлении малых колебаний защищаемой системы, что весьма важно для защиты точных приборов. При низких уровнях динамических напряжений собственное демпфирование защищаемой системы вследствие внутреннего трения будет очень малым. Поэтому эффективность динамических гасителей колебаний в этой области будет высокой.

Развитие теории динамических гасителей колебаний может идти по следующим направлениям – углубление теории расчета, основанном на детальном изучении особенностей защищаемых конструкций; решение задач оптимизации их параметров; создание комбинированных средств виброзащиты и разработка их теории, а также исследование устойчивости систем.

Исходя из вышесказанных факторов, в настоящее время *актуальной и важной* является задача моделирование динамики и исследования устойчивости виброзащитных систем с упругодиссипативными характеристиками гистерезисного типа и жидкостными звеньями. В настоящей работе сделан еще один шаг в данной области науки.

Степень изученности проблемы. Задача виброзащиты упругих систем впервые была рассмотрена в начале XX столетия Фрамом, который запатентовал конструкцию динамического гасителя колебаний. В первых исследованиях проведенных в начале прошлого века рассматривались динамические гасители колебаний без демпфирования. Такие гасители позволяют получить эффект гашения колебаний главной массы лишь при

одном значении частоты возмущающей гармонической силы, которая совпадает с его парциальной частотой. Для расширения полосы гашения в линейный гаситель вводят оптимальное демпфирование, применяют управляемые гасители, которые при изменении частоты возмущающей силы соответственно изменяют настройку гасителя, используют гасители с сыпучими средами или нелинейными характеристиками упругого элемента, а также различные динамические гасители колебаний с комбинированными упругодемпфирующими элементами.

Среди нелинейных характеристик упругих элементов особое значение имеет внутреннее неупругое сопротивление, действие которого выражается в гистерезисных потерях энергии при деформациях. Многочисленными теоретическими и экспериментальными исследованиями (проведенные Н.Н.Давыденковым, Д.Ю.Пановым, Е.С.Сорокиным, Г.С.Писаренко и др.) установлено, что гистерезисное трение не зависит от скорости деформации, а зависит от величины деформации, причем эта зависимость различна при нагружении и разгрузке, и представляется петлей гистерезиса. Исследование динамики виброзащитных систем, включающих в себе упругодемпфирующие элементы, имеет особое значение в теории нелинейных виброзащитных систем.

Большой вклад в проблему виброгашения с применением различных динамических гасителей колебаний внесли А.М.Алексеев, Ш.Алимухаммедов, О.М.Дусматов, С.В.Елисеев, Б.Г.Коренев, В.Б.Ларин, В.П.Легеза, Г.П.Нерубенко, М.А.Павловский, Л.М.Резников, Л.М.Рыжков, А.К.Сборовский, Дж.Сноудон, К.В.Фролов и др.

Несмотря на многочисленные публикации, задача исследования нелинейных колебаний виброзащитных систем далека от совершенства.

Связь диссертационной работы с планами НИР. Тема диссертационной работы связана с планом НИР в рамках гранта 1 Ф 1.2.8. – «Разработка теории исследования динамических систем с качением и виброзащитных систем» Центра науки и технологии, выполненной в СамГУ 2003-2007 г.г., а также комплексной проблемы с госбюджетной темой № 1.5 «Исследование колебаний и устойчивости дискретно-непрерывных систем, взаимодействующих с деформируемой средой».

Целью работы является разработка общих подходов к исследованию устойчивости виброзащитных систем с упругодемпфирующими элементами гистерезисного типа и жидкостными звеньями при гармонических и случайных воздействиях, определение областей устойчивости движения; исследование устойчивости виброзащитных систем с сосредоточенными и распределенными параметрами в зависимости от конструктивных параметров при учете нелинейных свойств элементов системы.

Задачи исследования. Для достижения поставленной в работе цели необходимо было решить следующие задачи:

- разработать на основе методов гармонической и статистической линеаризации методику решения задач об устойчивости нелинейных колебаний виброзащитных систем с упругодемпфирующими характеристиками гистерезисного типа при гармонических и случайных

воздействиях;

- исследовать устойчивость стационарных колебаний рассматриваемых виброзащитных систем с учетом нелинейных свойств элементов, найти условия и области устойчивости данных систем;
- исследовать устойчивость стационарных колебаний виброзащитных систем с упругодемпфирующими характеристиками гистерезисного типа и жидкостными звеньями, определить условия и области устойчивости систем виброзащиты при учёте нелинейных свойств упругих и жидкостных элементов;
- на примере системы, состоящей из упругого стержня и динамического гасителя колебаний, исследовать устойчивость виброзащитных систем с распределенными параметрами, определить условия и области устойчивости дискретно-непрерывных виброзащитных систем при гармонических воздействиях;
- произвести численный анализ для различных случаев.

Объект и предмет исследования. В работе рассматриваются вопросы устойчивости механических систем, содержащих виброзащищаемые объекты и динамические гасители колебаний с упругодемпфирующими характеристиками гистерезисного типа и жидкостными звеньями. В качестве виброзащищаемых объектов рассмотрены твердые тела и упругий стержень; в качестве динамических гасителей колебаний твердые тела, положенные в упругих элементах, а также жидкостных звеньях.

Методы исследований. Исследования основываются на методах нелинейной механики, эквивалентной линеаризации нелинейных систем и теории устойчивости движения Ляпунова. Для исследования устойчивости рассматриваемых систем применяются частотные методы нелинейной механики и метод вертикальных касательных.

Гипотезы исследования. Применение эквивалентной линеаризации к нелинейным задачам виброзащитных систем, позволяют исследовать динамику и устойчивость с помощью классической теории устойчивости. Для описания петли гистерезиса, применяется гипотеза Г.С.Писаренко.

Основные положения, выносимые на защиту:

- разработана методика исследования устойчивости виброзащитных систем с учетом нелинейных свойств гистерезисного типа, показана эквивалентность метода исследования устойчивости составлением характеристического уравнения и метода вертикальных касательных на амплитудно-частотной характеристики виброзащитных систем, проведен сопоставительный анализ и численные расчеты;

- исследована устойчивость виброзащитных систем с упругодемпфирующими характеристиками гистерезисного типа при гармонических и случайных воздействиях, получены условия устойчивости в виде неравенств от амплитуд и частот колебаний, которые дают возможность исследовать устойчивость системы в зависимости от конструкционных параметров;

- решена задача устойчивости виброзащитной системы с

упругодемпфирующими характеристиками гистерезисного типа и жидкостными звеньями, показана возможность появления неустойчивых колебаний, найдены границы устойчивости, показано, что при нулевой плавучести динамический гаситель колебаний не влияет на устойчивость системы, исследовано влияние параметров на устойчивость системы;

- решена задача устойчивости нелинейных стационарных колебаний упругого стержня с динамическим гасителем колебаний с упругодиссипативными характеристиками гистерезисного типа при гармонических воздействиях; получены выражения для определения области устойчивости рассматриваемой дискретно-непрерывной системы.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- разработана на основе методов гармонической и статистической линеаризации методика решения задач устойчивости нелинейных стационарных колебаний виброзащитных систем при гармонических и случайных воздействиях;

- поставлен и решен новый класс задач теории устойчивости колебательных движений нелинейных виброзащитных систем с упругодемпфирующими характеристиками гистерезисного типа и жидкостными звеньями;

- получены условия устойчивости и определены границы области устойчивости виброзащитных систем с учетом нелинейных свойств элементов при различных воздействиях;

- разработана методика решения задачи устойчивости дискретно-непрерывной нелинейной виброзащитной системы при гармонических воздействиях; найдены условия устойчивости движений системы; определены области устойчивости в зависимости от их параметров.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Исследования, проводимые в данной работе, позволяют более обоснованно подходить к расчетам в области применения виброзащитных систем, учитывая нелинейных характеристик упругодемпфирующих и жидкостных элементов конструкций при различных воздействиях, а также решать ряд проблем механики виброзащитных систем с учетом нелинейных свойств упругих и жидкостных элементов.

Реализация результатов. Результаты, полученные в данной работе, могут использоваться при проектировании и расчете устойчивости различных видов виброзащитных систем при гармонических и случайных воздействиях; при расчете динамических гасителей колебаний, применяемых в различных аспектах техники - судостроении, машиностроении, авиастроении.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались: на семинарах кафедры Механики Самаркандского государственного университета (2002-2009); на Международной научной конференции «Инфокоммуникационные и вычислительные технологии в науке, технике и образовании» (г. Ташкент, 2004); на Международной научной конференции «Дифференциальные уравнения с частными производными и родственные проблемы анализа и информатики», (г. Ташкент, 2004); на

Международной научной конференции по современным проблемам математической физики и информационных технологий (г. Ташкент, 2005); на Республиканской научной конференции «Дифференциальные уравнения и их приложения» (г. Самарканд, 2005); на Международной научной конференции «Современные проблемы и перспективы механики» (г. Ташкент, 2006), Международной научной конференции «Современные проблемы механики» (г. Самарканд, 2007), на научном семинаре по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика», 01.02.05 – «Механика жидкости и газа» при объединенном специализированном совете К.025.01.02 (Ташкент, 2009).

Опубликованность результатов. По материалам диссертационной работы опубликовано 11 работ, из них 5 журнальных статей.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из четырех глав, заключения, списка литературы из 116 наименований, 21 рисунка. Работа изложена на 107 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен обзор литературы по виброзащитным системам, обоснована актуальность темы и цель диссертационной работы, сформулирована постановка задачи, приведены методики решения поставленных задач. Приведены основные полученные результаты, выносимые на защиту.

Во второй главе рассмотрена задача исследования устойчивости нелинейных колебаний виброзащищаемой системы с динамическим гасителем колебаний и упругодемпфирующими характеристиками гистерезисного типа при гармонических и случайных воздействиях.

Для решения нелинейной системы дифференциальных уравнений применен метод гармонической линеаризации.

Для исследования устойчивости получены амплитуды стационарных колебаний виброзащищаемой системы с динамическим гасителем колебаний

$$\begin{aligned}
 a_{20} &= \frac{k_1^2 \varepsilon \xi}{\sqrt{\left[(1 - \nu_1) k_2^2 (\mu k_1^2 + (1 + \mu) \Delta \omega_1) - \omega^2 \Delta \omega_1 \right]^2 + \left[\nu_2 k_2^2 (\mu k_1^2 + (1 + \mu) \Delta \omega_1) \right]^2}}; \\
 a_{10} &= \frac{\varepsilon \xi \sqrt{\left[(1 + \mu) k_2^2 \nu_2 \right]^2 + \left[\Delta \omega_2 + (1 + \mu) \nu_1 k_2^2 \right]^2}}{\sqrt{\left[(1 - \nu_1) k_2^2 (\mu k_1^2 + (1 + \mu) \Delta \omega_1) - \omega^2 \Delta \omega_1 \right]^2 + \left[\nu_2 k_2^2 (\mu k_1^2 + (1 + \mu) \Delta \omega_1) \right]^2}},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $k_1 = \sqrt{\frac{c_1}{m_1}}$; $k_2 = \sqrt{\frac{c_2}{m_2}}$ - собственные частоты; $\mu = \frac{m_2}{m_1}$ - отношение масс; ω , $\varepsilon \xi$ - частота и амплитуда возбуждения; $\Delta \omega_1 = \omega^2 - k_1^2$ и $\Delta \omega_2 = \omega^2 - (1 + \mu) k_2^2$ - расстройки частот; ν_1, ν_2 - коэффициенты линеаризации.

Закон изменения частоты от амплитуды колебаний, находится из выражения для определения скелетных кривых при резонансах, которое

записывается в виде

$$(1 - \nu_1)k_2^2(\mu k_1^2 + (1 + \mu)\Delta\omega_1) = \omega^2 \Delta\omega_1. \quad (2)$$

Устойчивость стационарных колебаний рассматриваемых виброзащитных систем во многом зависит от величины изменения частоты колебаний. Из выражения (2) можно сделать вывод, что с ростом коэффициента ν_1 увеличивается загиб скелетной кривой, что способствует появлению неустойчивых стационарных решений.

Выражения, позволяющие определить амплитуды колебаний виброзащищаемого тела при резонансах

$$\nu_2 k_2^2(\mu k_1^2 + (1 + \mu)\Delta\omega_1) a_2 = k_1^2 \varepsilon \xi, \quad (3)$$

из которого видно, что амплитуды колебаний рассматриваемой виброзащитной системы зависит от величины коэффициента ν_2 , и с его ростом уменьшается.

Получено характеристическое уравнение

$$(2\omega\lambda)^4 + b_1(2\omega\lambda)^3 + b_2(2\omega\lambda)^2 + b_3(2\omega\lambda) + b_4 = 0; \quad (4)$$

где $b_1 = (1 + \mu)k_2^2(2\nu_1 + \nu_2')$;

$$b_2 = \Delta\omega_1^2 + \Delta\omega_2^2 + \mu k_1^2 k_2^2(2 - (2\nu_1 + a_2\nu_1')) + (1 + \mu)^2 k_2^4 [(a_2\nu_1)'\nu_1 + (a_2\nu_2)'\nu_2] + (1 + \mu)k_2^2 \Delta\omega_2^2(2\nu_1 + a_2\nu_1'); \quad b_3 = k_2^2(2\nu_2 + a_2\nu_2')(\mu\omega^4 + \Delta\omega_1^2);$$

$$b_4 = g_1^2 [(a_2\nu_1)'\nu_1 + (a_2\nu_2)'\nu_2] + g_1 g_2(2\nu_1 + \nu_2') + g_2^2;$$

$$g_1 = k_2^2(\mu k_1^2 + (1 + \mu)\Delta\omega_1); \quad g_2 = \Delta\omega_1 \Delta\omega_2 - \mu k_1^2 k_2^2;$$

$$\nu_1' = \frac{d\nu_1(a_{20})}{da_2}, \quad \nu_2' = \frac{d\nu_2(a_{20})}{da_2}, \quad (a_2\nu_1)' = \frac{d(a_2\nu_1)}{da_2}(a_{20}), \quad (a_2\nu_2)' = \frac{d(a_2\nu_2)}{da_2}(a_{20}).$$

На основе критерия Гурвица исследована устойчивость стационарных колебаний рассматриваемой системы, получены условия устойчивости:

$$(a_2\nu_1')^2 - 4(a_2\nu_2)'\nu_2 > 0, \quad (5)$$

где производные вычисляются по стационарным амплитудам; а также выражения для определения областей устойчивости

$$(\gamma - \gamma_1)(\gamma - \gamma_2) > 0, \quad (6)$$

$$\text{где } \gamma = \frac{(\chi - 1)^2 - \mu\chi}{(1 + \mu)\chi - 1}; \quad \gamma_1 = \frac{1}{2}(-\beta_1 + \beta_2); \quad \gamma_2 = \frac{1}{2}(-\beta_1 - \beta_2),$$

$$\beta_1 = 2\nu_1 + a_2\nu_1'; \quad \beta_2 = \sqrt{(a_2\nu_1')^2 - 4\nu_2(a_2\nu_2)'}. \quad (7)$$

Из (6) видно, что при выполнении обратного неравенства (5) в области изменения частоты $\gamma_1 > \gamma > \gamma_2$, амплитуды колебаний будут неустойчивыми. Для линейной зависимости декремента колебаний от амплитуды, т.е. при $\delta(a_2) = \mu_1 a_2$, колебания системы всегда устойчивы; когда в выражении декремента колебаний появляются нелинейные члены от амплитуды, могут появиться неустойчивые решения. На рисунке 1 изображено изменение границы области устойчивости рассматриваемой виброзащитной системы с упругодемпфирующими характеристиками гистерезисного типа при значениях параметров $k_1 = 60 \text{ Гц}$, различных значений μ : $\mu = 0,1$; $0,15$; $0,25$ для полимерного материала эпоксиуретана марки КДУ-2. Из графиков видно, что с увеличением отношения масс расширяется область неустойчивых амплитуд, и неустойчивые частоты уходят от частоты антирезонанса. Построены границы области устойчивости рассматриваемой системы (рис. 2) в зависимости от собственной частоты колебаний виброзащищаемого тела k_1 . Из графиков видно, что с увеличением собственной частоты колебаний защищаемого объекта, области неустойчивых амплитуд расходятся. Сделан вывод, что с ростом амплитуд колебаний область неустойчивости данной виброзащитной системы расширяется.

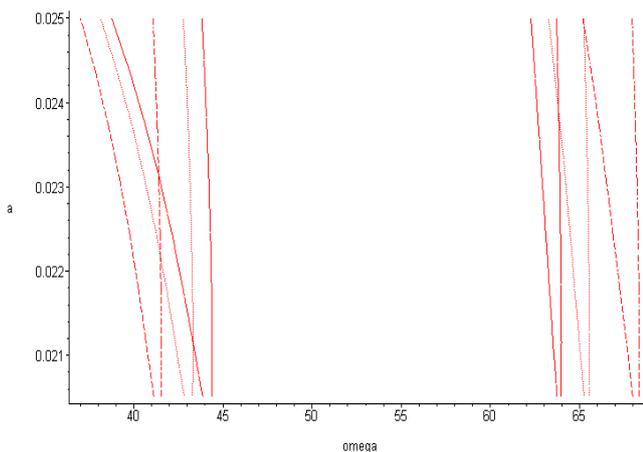


Рис. 1. Изменение области неустойчивых амплитуд с изменением параметра $\mu = 0,1$ (сплошная линия), $0,15$ (полупунктирная), $0,25$ (пунктирная); $k_1 = 60 \text{ Гц}$.

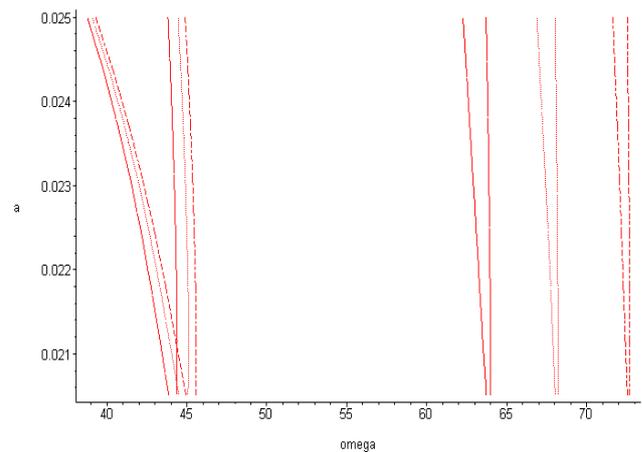


Рис. 2. Границы областей устойчивости виброзащитной системы при значениях $k_1 = 60$ (сплошная линия), 65 (полупунктирная), 70 (пунктирная) Гц ; $\mu = 0,1$.

Решена задача устойчивости стационарных колебаний виброзащитной системы с динамическим гасителем колебаний линейной характеристикой (§2.2). Получены выражения стационарных колебаний, а также резонансных кривых, позволяющие определить величину загиба скелетной кривой на графике амплитудно-частотной характеристики. Построены амплитудно-частотные характеристики (рис.3). Показано, что нелинейные стационарные колебания системы, можно полностью погасить только при определенной частоте возмущения, равной $\omega = \sqrt{1 + \mu k_2}$.

Получены условия наличия вертикальной касательной на графике

амплитудно-частотной характеристики, которые позволяют определить границы области устойчивости рассматриваемой системы

$$\Delta\omega_1\Delta\omega_2 + \Delta\omega_3 k_1^2 \beta_1 = \pm \beta_2 k_1^2 \Delta\omega_3. \quad (7)$$

Неустойчивые решения появляются при положительных значениях подкоренной функции β_2 , график которой изображен на рисунке 4. При отрицательных значениях данной функции, соответствующих колебаниям с малыми амплитудами стационарные решения рассматриваемой системы устойчивы.

Сравнением амплитудно-частотных характеристик виброзащитных систем с линейной и нелинейной упругой характеристикой показано, что амплитудно-частотная характеристика виброзащитной системы с линейной упругой характеристикой виброзащитаемого тела и гистерезисной упругой характеристикой динамического гасителя колебаний качественно отличается от амплитудно-частотной характеристики виброзащитной системы с динамическими гасителями колебаний линейными характеристиками, тем, что при использовании последнего амплитудно-частотная характеристика виброзащитной системы имеет нулевое значение при некоторой частоте внешнего воздействия, тогда как при использовании динамического гасителя колебаний с нелинейной упругой характеристикой не имеет нулевого значения, ни при каких значениях частоты внешнего воздействия.

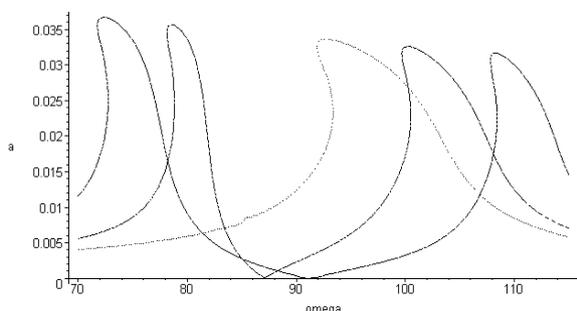


Рис. 3. Амплитудно частотная характеристика виброзащитной системы с линейным динамическим гасителем колебаний при различных значениях $\mu = 0,15; 0,05; 0$ (заштрихована).

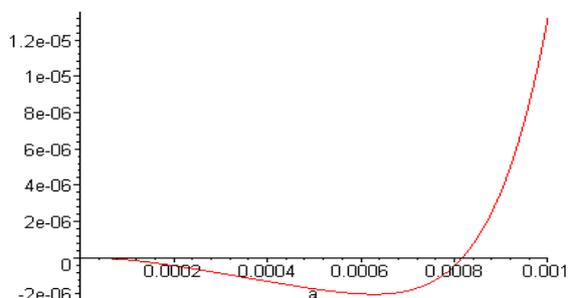


Рис. 4. График функции $f(a) = (av_1')^2 - 4(av_2')v_2$.

Исследована устойчивость виброзащитных систем при случайных воздействиях (§2.3). Ускорение движения основания принято стационарным нормальным процессом с нулевым математическим ожиданием.

Найдены выражения для определения среднеквадратических значений переменных перемещений x_1 и x_2 в виде:

$$\sigma_1^2 = \frac{\sigma_{w_0}^2 \left(((1+\mu)k_2^2\nu_2)^2 + (\mathcal{G}^2 - (1+\mu)k_2^2 + (1+\mu)\nu_1 k_2^2)^2 \right)}{\left[\mathcal{G}^4 - \mathcal{G}^2 k_1^2 + (1-\nu_1)k_2^2 (k_1^2 - (1+\mu)\mathcal{G}^2) \right]^2 + \left[\nu_2 k_2^2 (k_1^2 - (1+\mu)\mathcal{G}^2) \right]^2}; \quad (8)$$

$$\sigma_2^2 = \frac{\sigma_{w_0}^2}{\left[\mathcal{G}^4 - \mathcal{G}^2 k_1^2 + (1-\nu_1)k_2^2 (k_1^2 - (1+\mu)\mathcal{G}^2) \right]^2 + \left[\nu_2 k_2^2 (k_1^2 - (1+\mu)\mathcal{G}^2) \right]^2}.$$

В результате исследования устойчивости рассматриваемой системы получены условия наличия вертикальных касательных на графиках среднеквадратических значений σ_1^2 и σ_2^2 переменных x_1 и x_2 , которые свидетельствуют о наличии неустойчивых решений в виде скачкообразного изменения среднеквадратических значений. На основе полученных выражений для среднеквадратических значений проведен численный анализ. Показано, что расширением полосы спектра случайного процесса влияние динамического гасителя колебаний на резонирующих частотах уменьшается, эффект динамического гасителя колебаний снижается, увеличивается устойчивость виброзащитной системы. Получены графики соответствующих амплитудно-частотных характеристик при узкополосных и широкополосных случайных воздействиях.

Третья глава посвящена решению и исследованию задачи устойчивости виброзащитных систем с упругодиссипативными характеристиками гистерезисного типа и жидкостным звеном.

Для исследования устойчивости найдены амплитудно-частотные характеристики виброзащитной системы. Исследуя устойчивость данной виброзащитной системы, получена квадратичная форма, зависящая от амплитуды и частоты колебаний, равенство к нулю, которой позволяет получить уравнение для определения частот неустойчивых решений. Рассматривая полученное уравнение, показана, что квадратичная форма не является положительно определенной, что означает наличие неустойчивых решений. Проведен численный анализ при различных значениях параметров системы. Построены амплитудно-частотные характеристики рассматриваемой системы при различных значениях присоединенной массы динамического гасителя колебаний. Выяснено, что неустойчивые частоты с ростом массы m_n приближаются к частоте антирезонанса. Получены области неустойчивых стационарных амплитуд на различных плоскостях.

На рисунке 5 представлены графики амплитудно-частотной характеристики виброзащитной системы с упругодемпфирующими характеристиками гистерезисного типа и жидкостным звеном при значениях параметров $\frac{m_n}{m_1}$: 0,05; 0,15; 0,25. Из рисунка хорошо рассматривается

приближение двух резонансных пиков при увеличении данного отношения масс. На рисунках 6 и 7 изображены амплитудно-частотные характеристики и границы областей устойчивости рассматриваемой виброзащитной системы при значениях $k_1=0; 0,1; 0,25; k_2=0,2$, с упругим элементом из полимерного материала эпоксиуретана марки КДУ-2 ($E=2,02 \cdot 10^8$ Н/м²; при комнатной

температуре). Из полученного рисунка можно сделать вывод, что области неустойчивости становится намного узким с использованием высокого демпфирования защищаемого объекта, но при этом влияние внешних нагрузок на защищаемый объект увеличивается. Поэтому выбор уровня демпфирования при виброзащите с динамическим гасителем желательно выбирать исходя из эксплуатационных режимов.

На рисунке 8 изображены амплитудно-частотные характеристики виброзащитной системы с упругодемпфирующими характеристиками гистерезисного типа и жидкостным звеном при значениях параметров $\mu = \frac{m_2 - m_e}{m_2 + m_n} = 0,36; 0,27; 0,22; k_2=0,2; c_1=1100\text{Н/м}; k_1=0,1$. Из рисунка хорошо рассматривается приближение резонансных частот амплитудно-частотной характеристики виброзащитной системы к частоте антирезонанса. При этом увеличиваются амплитуды колебаний. Из этого следует, что с уменьшением значения данного параметра эффект виброзащиты уменьшается.

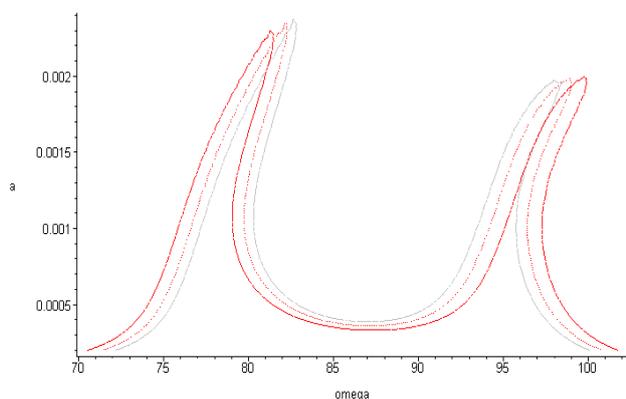


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика виброзащитной системы с жидкостным звеном при значениях $\frac{m_n}{m_1}$: 0,05(сплошная линия); 0,15(полупунктирная); 0,25(пунктирная).

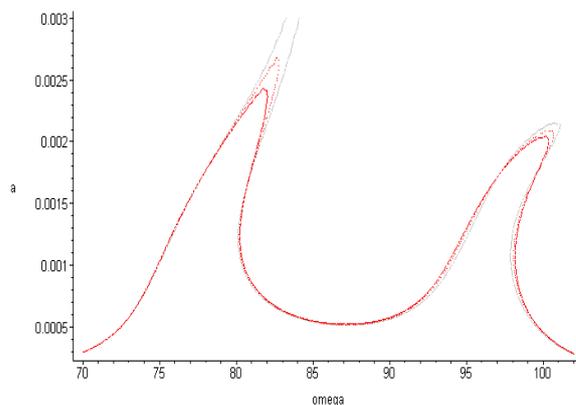


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика виброзащитной системы при значениях $k_1=0$ (сплошная); 0,1(полупунктирная); 0,25(пунктирная); $k_2=0,2$.

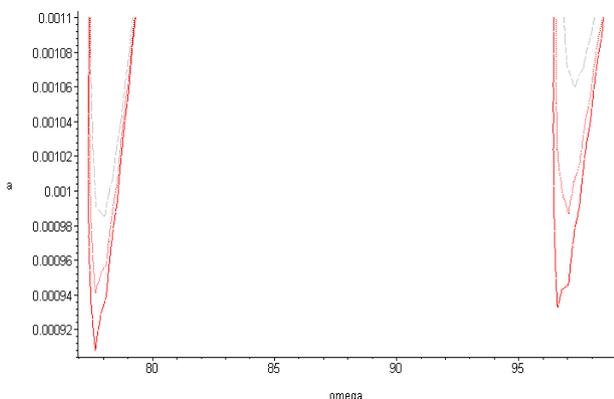


Рис. 7. Границы областей устойчивости виброзащитной системы при значениях $k_1=0$ (сплошная); 0,1(полупунктирная); 0,25(пунктирная); $k_2=0,2$.

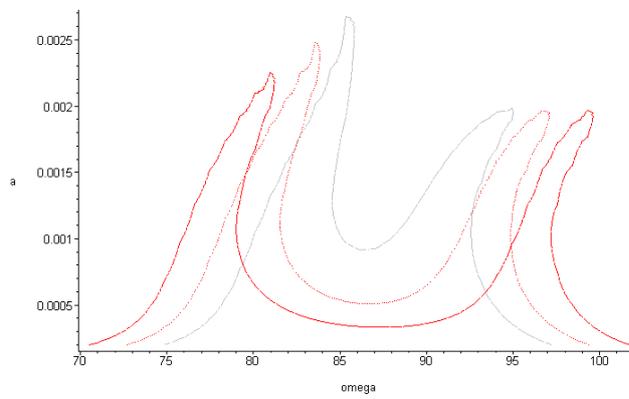


Рис. 8. Амплитудно-частотная характеристика виброзащитной системы при значениях параметра $\mu = \frac{m_2 - m_e}{m_2 + m_n} = 0,36$ (сплошная); 0,27(полупунктирная); 0,22(пунктирная); $k_2=0,2; c_2=1000\text{Н/м}; c_1=1100\text{Н/м}; k_1=0,1$.

Четвертая глава посвящена исследованию устойчивости нелинейных колебаний упругого стержня с динамическим гасителем колебаний при гармонических воздействиях.

При исследовании получены амплитудно-частотные характеристики гармонических колебаний стержня с динамическим гасителем колебаний и упругодемпфирующими характеристиками гистерезисного типа:

$$\begin{aligned}\Phi(q_{ka}) &= |q_{ka}| = \frac{W_0}{|\Delta|} \left\{ [d_k \omega^2 - n^2(1 - \theta_1 Q)(\mu \mu_k u_{k0} + d_k)]^2 + [\theta_2 Q n^2 (\mu \mu_k u_{k0} + d_k)]^2 \right\}^{1/2}; \\ \Phi(\zeta_a) &= |\zeta_a| = \frac{W_0}{|\Delta|} \left\{ [(1 - d_k u_{k0}) \omega^2 - p_k^2(1 - \eta_1 R)]^2 + [\eta_2 p_k^2 R]^2 \right\}^{1/2},\end{aligned}\quad (9)$$

где $\eta_1, \eta_2, \theta_1, \theta_2$ – постоянные коэффициенты, зависящие от упругодиссипативных свойств материалов стержня и упругого элемента ДГК;

$\mu = \frac{m}{m_c}$; $\mu_k = \frac{l}{d_{2k}}$; m_c и l – масса и длина стержня соответственно; $d_k = \frac{d_{1k}}{d_{2k}}$;

$u_{k0} = u_k(x_0)$ – собственные формы; $W_0 = \frac{\partial w_0}{\partial t^2}$; $n = \sqrt{\frac{c}{m}}$; p_k – частота собственных

колебаний стержня без рассеяния энергии; $d_{1k} = \int_0^l u_k dx$; $d_{2k} = \int_0^l u_k^2 dx$; Q, R –

функции определяющие зависимость гистерезисных потерь в зависимости от перемещений соответственно упругого элемента динамического гасителя колебаний и стержня.

Выражение для определения области устойчивости с линейными упругими характеристиками в материале стержня, т.е. при $R = const$ и $\eta_2 = 0$; имеет вид

$$\begin{aligned}\omega^4 - \omega^2 (n^2(1 + \mu \mu_k u_0^2) + p_k^2(1 - \eta_1 R)) + p_k^2(1 - \eta_1 R)n^2 = \\ = \frac{1}{2} \left[-\theta_1(2Q + Q'\zeta) \pm \sqrt{\theta_1^2 \zeta^2 Q^2 - 4Q(Q'\zeta)\theta_2} \right] [(1 + \mu \mu_k u_0^2)\omega^2 - p_k^2(1 - \eta_1 R)]n^2,\end{aligned}\quad (10)$$

а для виброзащитной системы с линейными упругодемпфирующими характеристиками динамического гасителя колебаний, т.е. при $Q = const$ и $\theta_2 = 0$ имеет вид

$$\begin{aligned}(2(\omega^2 - p^2)(\omega^2 - n^2(1 - \theta_1 Q)) - n^2(1 - \theta_1 Q)\mu \mu_k u_0^2 \omega^2 + (2R + R'q_k)\eta_1 B)^2 = \\ = (p^2(\omega^2 - n^2(1 - \theta_1 Q)))^2 [(\eta_1 R'q_k)^2 - 4\eta_2^2 R(Rq_k)']\end{aligned}\quad (11)$$

Исследована устойчивость системы при различных значениях отношения масс и при различных значениях точки закрепления динамического гасителя.

Показано, что если $x_0 = \frac{l}{3}$ и $\frac{2l}{3}$, где значение третьей формы колебаний равно нулю, т.е. точка установки динамического гасителя колебаний является узлом, то влияние динамического гасителя на колебания стержня незаметны. Для сравнения построены амплитудно-частотные характеристики упругого стержня без динамического гасителя и с динамическим гасителем, установленным на узле.

Построены границы областей устойчивости. Показано, что с ростом внешней амплитуды возбуждения, область неустойчивости колебаний данной системы значительно расширяется. Рассмотрены случаи $Q = \alpha \cdot \zeta_a^n$, при значениях $n=1$, $n=2$ и $n=3$. Показано, что с ростом степени данной функции увеличивается область неустойчивых стационарных колебаний рассматриваемой виброзащитной системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной диссертационной работе получены следующие основные результаты:

- исследована устойчивость виброзащитных систем с упругодемпфирующими характеристиками гистерезисного типа и жидкостными звеньями. Разработана на основе метода гармонической и статистической линеаризации методика решения задач динамики и устойчивости нелинейных колебаний виброзащитной системы с упругодемпфирующими характеристиками гистерезисного типа при гармонических и случайных колебаниях. Для исследования устойчивости рассматриваемых виброзащитных систем применены два метода: классический метод Ляпунова (исследование устойчивости по первому приближению) и метод вертикальных касательных на графике амплитудно-частотной характеристики. Показано полное соответствие полученных данными методами результатов – условий и границ областей устойчивости виброзащитных систем. Рассмотрены следующие типы виброзащитных систем с упругодемпфирующими характеристиками гистерезисного типа:

- несущее тело (защищаемый объект) на вибрирующем основании и присоединенное к нему линейными и нелинейными упругодемпфирующими элементами твердое тело динамического гасителя колебаний;
- виброзащитная система с динамическим гасителем колебаний, включающая жидкостное звено и упругодемпфирующий элемент гистерезисного типа;
- упругий стержень с динамическим гасителем колебаний и упругодемпфирующими элементами гистерезисного типа;

- получены условия и выражения для определения областей устойчивости стационарных колебаний перечисленных виброзащитных систем при гармонических и случайных воздействиях. Показано, что при использовании

гасителей с линейными упругодемпфирующими характеристиками, в отличие от гасителей с нелинейными характеристиками, имеется возможность полного гашения колебаний защищаемого объекта, но только при определенной частоте внешнего воздействия. Построены области устойчивости рассматриваемых систем при различных значениях параметров системы, а также системах переменных – амплитуда a - частота внешнего воздействия ω , собственная частота объекта k_1 - собственная частота гасителя k_2 , отношение масс μ - частота внешнего воздействия ω . Исследовано влияние коэффициентов гармонической линеаризации ν_1 и ν_2 на устойчивость виброзащитной системы. Показано, что устойчивость системы возрастает с ростом коэффициента ν_2 и уменьшением ν_1 . Исследовано влияние отношения масс (μ) динамического гасителя и основного элемента на устойчивость колебаний, показано, что уменьшением этого параметра частоты неустойчивых амплитуд приближаются с двух сторон к частоте антирезонанса;

- рассмотрена задача устойчивости виброзащитных систем с динамическим гасителем колебаний при случайных воздействиях, построены амплитудно-частотные характеристики рассматриваемой системы при узкополосных и широкополосных стационарных случайных процессах. Отмечено, что при случайных воздействиях эффект динамического гасителя не так велик по сравнению с гармоническими воздействиями, а также при случайных воздействиях меньше вероятность появления неустойчивых решений в виде скачков среднеквадратических значений;

- получены выражения стационарных колебаний виброзащитных систем с упругодемпфирующими характеристиками гистерезисного типа и жидкостным звеном. Получены условия неустойчивости стационарных амплитуд колебаний, выяснена возможность неустойчивых колебаний виброзащитных систем с упругодемпфирующими характеристиками гистерезисного типа и жидкостными звеньями, построены амплитудно-частотные характеристики и резонансные кривые рассматриваемых систем при различных значениях параметров системы;

- для виброзащитной системы, состоящей из упругого стержня и динамического гасителя колебаний с нелинейными упругодемпфирующими элементами, построены амплитудно-частотные характеристики при различных значениях параметров системы и различных местах точки установки динамического гасителя колебаний. Показано, что в случаях, когда динамический гаситель колебаний установлен в узловых точках, эффект динамического гасителя колебаний не наблюдается;

- рассмотрены случаи наличия и отсутствия внутреннего неупругого сопротивления в материале стержня. Изучены влияния изменения параметров системы на его устойчивость.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Буранов Х.М. Диссипативлик хоссалари гистерезис типида бўлган механик системаларнинг устиворлигини текшириш. // СамДУ илмий-тадқиқотлар ахборотномаси. – Самарқанд, 2004. - №1.- 20-21 бетлар.
2. Буранов Х.М. Исследование устойчивости виброзащитных систем с упругодиссипативными характеристиками гистерезисного типа.// Проблемы механики. – Ташкент, 2004. - № 5-6.- С. 3-7.
3. Дусматов О.М., Буранов Х.М. Моделирование динамики и анализ устойчивости комбинированных систем виброзащиты. // Доклады и тезисы международной научной конференции «Инфокоммуникационные и вычислительные технологии в науке, технике и образовании». - Ташкент, 2004. - С. 194-197.
4. Дусматов О.М., Буранов Х.М. Об устойчивости виброзащитных систем с упругими и жидкостными звеньями. // Проблемы архитектуры и строительства. – Самарқанд, 2004. - №2. - С. 21-24.
5. Дусматов О.М., Буранов Х.М. Устойчивость нелинейных систем виброзащиты с учетом диссипации энергии. // Межд. науч. конф. «Дифференциальные уравнения с частными производными и родственные проблемы анализа и информатики». – Ташкент, 2004. - т 1. - С. 37-38.
6. Буранов Х.М. Об устойчивости упругого стержня с динамическим гасителем колебаний при гармонических воздействиях. //Материалы республиканской конференции «Дифференциальные уравнения и их приложения». - Самарқанд, 2005. - т. 1. - С. 76-78.
7. Дусматов О.М., Буранов Х.М. Устойчивость нелинейных колебаний виброзащитных систем с линейными динамическими гасителями.// Проблемы механики. – Ташкент, 2005. - № 5-6. - С. 63-67.
8. Дусматов О.М., Буранов Х.М., Абсаломов Т. О нелинейных колебаниях упругого стержня с динамическим гасителем.// Материалы международной конференции по современным проблемам математической физики и информационных технологий. - Ташкент, 2005. - С. 156-158.
9. Дусматов О.М., Буранов Х.М., Абсаломов Т. Исследование устойчивости виброзащитных систем по графику амплитудно-частотной характеристики.// Материалы Международной научно-технической конференции «Современные проблемы и перспективы механики». – Ташкент, 2006. - С. 30-32.
10. Дусматов О.М., Буранов Х.М. Исследование устойчивости виброзащитных систем по графику амплитуды колебаний // Узбекский математический журнал. – Ташкент, 2006. - №3. - С. 36-39.
11. Дусматов О.М., Буранов Х.М. Определение устойчивости виброзащитных систем с жидкостными элементами при различных значениях параметров.// Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию академика Т.Ш. Ширинкулова. - Самарқанд, 2007. - книга-5. - С. 27-29.

Физика-математика фанлари номзоди илмий даражасига талабгор
Х.М.Бурановнинг 01.02.01 – «Назарий механика» ихтисослиги бўйича
**«Гистерезис типдаги эластикдемпферловчи характеристикали ва
суюқликли бўғинларга эга бўлган тебранишлардан химояланувчи
системаларнинг устиворлиги»** мавзусидаги диссертациясининг

РЕЗЮМЕСИ

Таянч сўзлар: барқарор тебранишлар, устиворлик, тебранишлардан химояланувчи система, тебранишларни динамик сўндиргич, суюқлик бўғини, эластик стержень, гистерезис энергия тарқалиши, гармоник чизиклаштириш коэффициентлари.

Тадқиқот объектлари: тебранишлардан химояланувчи системалар, гистерезис эластик-демпферловчи характеристикали ва суюқлик бўғинига эга бўлган динамик сўндиргич.

Ишнинг мақсади: гистерезис эластик-демпферловчи характеристикали ва суюқлик бўғинига эга бўлган тебранишлардан химояланувчи системаларнинг устиворлигини текширишнинг умумий ёндашувини ишлаб чиқиш.

Тадқиқот методлари: чизиклимас механиканинг усуллари, чизиклимас системаларни эквивалент чизиклаштириш усули, ҳаракат устиворлиги назариясининг усуллари.

Олинган натижалар ва уларнинг янгилиги: ишда гармоник ва тасодифий кўзғалишлардаги динамик сўндиргичли ва гистерезис эластик-демпферловчи характеристикали тебранишлардан химояланувчи системалар устиворлигини текшириш масалаларини ечиш методикаси ишлаб чиқилган; турли типдаги динамик сўндиргичли чизиклимас тебранишлардан химояланувчи системаларнинг гармоник ва тасодифий кўзғалишлардаги тебранишларининг янги типдаги масалалари ечилган; устиворлик шартлари ва устиворлик соҳаларининг чегараларини аниқлаш учун ифодалар олинган; қаралаётган системалар параметрларининг турли қийматлари учун амплитуда-частота характеристикалари, резонанс эгри чизиклари қурилган ва тебранишлардан химояланувчи системаларнинг бу параметрларининг ҳаракат устиворлигига таъсири ўрганилган; олинган натижалар олдиндан маълум бўлган бўлган натижалар билан таққосланган.

Амалий аҳамияти: олинган натижалар қурилмалар эластик элементларининг чизиклимас характеристикаларини эътиборга олиб, тебранишлардан химояланувчи системалар қўлланилиш соҳасидаги ҳисобларга асосланган ҳолда ёндашиш имконини беради.

Татбиқ этиш даражаси ва иқтисодий самарадорлиги: иш назарий характерга эга бўлиб, олинган натижалар янги типдаги техник системалар тебраниш жараёнларини чуқурроқ тушунишга ёрдам беради.

Қўлланиш соҳаси: олинган натижалар турли типдаги тебранишлардан химояланувчи системаларни ўрнатиш; гармоник ва тасодифий кўзғалишлардаги тебранувчи системалар устиворлигини текшириш ҳисоблари; техниканинг – кемасозлик, машиносозлик, авиасозлик каби соҳаларида деталларнинг мустаҳкамлиги ҳисобларида қўлланилиши мумкин.

РЕЗЮМЕ

диссертации Буранова Х.М. на тему: «**Устойчивость виброзащитных систем с упругодемпфирующими характеристиками гистерезисного типа и жидкостными звеньями**» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01–Теоретическая механика

Ключевые слова: стационарные колебания, устойчивость, виброзащитная система, динамический гаситель колебаний, жидкостное звено, упругий стержень, гистерезисное рассеяние энергии, коэффициенты линеаризации.

Объекты исследования: виброзащищаемые системы, динамический гаситель колебаний с упругодемпфирующими характеристиками гистерезисного типа и жидкостными звеньями.

Цель работы: разработка общих подходов к исследованию устойчивости виброзащитных систем с упругодемпфирующими элементами гистерезисного типа и жидкостными звеньями.

Методы исследования: методы нелинейной механики, эквивалентная линеаризация нелинейных систем, методы теории устойчивости движения.

Полученные результаты и их новизна: в работе разработана методика решения задач устойчивости виброзащитных систем с динамическими гасителями колебаний и упругодемпфирующими характеристиками гистерезисного типа при гармонических и случайных воздействиях; решены новые классы задач теории устойчивости колебательных движений нелинейных виброзащитных систем с различными видами динамических гасителей при гармонических и случайных воздействиях; получены условия и выражения для определения границы областей устойчивости; построены амплитудно-частотные характеристики, резонансные кривые при различных соотношениях параметров системы и изучены влияния параметров виброзащитных систем на устойчивость движения; сравнены полученные результаты с ранее известными результатами.

Практическая значимость: полученные результаты позволяют более обоснованно подходить к расчетам в области применения виброзащитных систем, учитывая нелинейные характеристики упругодемпфирующих элементов конструкций при различных воздействиях.

Степень внедрения и экономическая эффективность: работа носит теоретический характер, полученные результаты диссертации позволяют более глубоко понимать колебательные процессы новых типов виброзащитных систем в технических системах.

Область применения: полученные результаты могут использоваться при проектировании различных видов виброзащитных систем; при расчете устойчивости колебательных систем при гармонических и случайных воздействиях; при расчете прочности деталей в различных аспектах техники - судостроении, машиностроении, авиастроении.

RESUME

Thesis of Buranov Kh.M. on the scientific degree competition of the candidate of sciences in physic-mathematical on speciality 01.02.01-Theoretical mechanics, subject: «**Stability of vibroprotection systems with elastic-damper characteristics of hysteresis type and liquid links**».

Key words: stationary oscillations, stability, vibroprotection system, dynamic absorber, liquid links, elastic bar, hysteresis energy dispersion, factors linearization.

Subjects of research: vibroprotection systems, dynamic absorber of oscillations with elastic-damper characteristics of hysteresis type and liquid links.

Purpose of work: the study of dynamics and stability of vibroprotection systems with dynamic absorbers of oscillations at harmonic and random influences and also influences of parameters to the stability of considered systems.

Method of research: methods of nonlinear mechanics, equivalent linearization of nonlinear systems, methods of motion stability theory.

The results achieved and their novelty: the technique of the solution of problems of stability vibroprotection systems with dynamic absorbers of oscillations and elastic-damper characteristics of hysteresis type at harmonic and random influences in work is developed; new classes of problems of the theory of stability of oscillative motions of nonlinear vibroprotection systems with various kinds of dynamic absorbers at harmonic and random influences are solved; conditions and expressions for definition of borders of areas of stability are received; amplitude-frequency characteristics, resonant curves at various parities of parameters of system are constructed and influences of parameters vibroprotection systems on stability of movement are studied; the received results are compared with earlier known results.

Practical value: The received results allow more detailed approach computations in the field of application of vibroprotection systems, considering structures with nonlinear characteristics of elastic-damper elements at various influences.

Degree of embed and economic effectivity: thesis has theoretical character; the received results of the dissertation allow to deeply understanding the oscillatory processes of new types of vibroprotection systems in technical systems.

Sphere of usage: the received results can be used in designing of various kinds vibroprotection systems; in computation of stability of oscillatory systems at harmonic and random influences; in computation of strength of details in various aspects of technics - shipbuilding, mechanical engineering, aircraft engineering.