

На правах рукописи



ЗЕБИЛИЛА МОХАММЕД ДИИН-ХАЛИС

**РАСЧЕТ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ
ВИБРОИЗОЛЯЦИИ С ЛИНЕЙНЫМИ И НЕЛИНЕЙНЫМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

Специальность 05.23.17 – «Строительная механика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

Чернов Юрий Тихонович

Официальные оппоненты: **Травуш Владимир Ильич**

Академик РААСН, доктор технических наук, профессор, ЗАО «Горпроект», заместитель генерального директора, главный конструктор

Сизов Дмитрий Константинович

кандидат технических наук,

ООО "Виброзащита", начальник отдела

виброизмерений и проектирования виброзащиты

Ведущая организация:

Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций (ЦНИИСК) имени В.А. Кучеренко

Защита состоится «18» декабря 2018 года в 10.00 на заседании диссертационного совета Д218.005.05, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 7618.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)». <http://www.miit.ru>.

Автореферат разослан «16» ноября 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Шавыкина Марина Витальевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы. Вибрации элементов конструкций зданий и сооружений, возбуждаемые виброактивным оборудованием, могут достигать значительных уровней и приводить к серьезным последствиям: появлению и развитию трещин; дополнительным осадкам; нарушению технологических процессов; дискомфорту и превышению уровней, допускаемых Санитарными нормами. Одним из наиболее распространенных методов снижения уровней колебаний является виброизоляция: активная (снижает нагрузку на основание) и пассивная (снижает уровень колебаний виброчувствительного оборудования). Наиболее эффективна виброизоляция машин с периодическими нагрузками (насосов, вентиляторов, компрессоров и т.п.).

При определенных соотношениях частот собственных колебаний виброизолированного оборудования с ударными нагрузками (штампов, молотов и т.п.) и опорных конструкций, нагрузка, передающаяся на опорные конструкции, также может значительно снижаться.

При оценке эффективности систем виброизоляции машин с периодическими нагрузками обязательным является расчет в переходных режимах (пуска и остановки) при прохождении через резонанс.

При больших перемещениях в этих зонах нарушается контакт с вспомогательным оборудованием, трубопроводами и т.п. Сами виброизоляторы могут разрушаться в результате малоциклового усталости.

Снизить уровни колебаний в этих режимах возможно, вводя дополнительные элементы - связи, диссипативные системы, дополнительные массы.

Характеристики виброзащитных систем становятся нелинейными, а их расчет сводится к расчету нелинейных систем с конечным числом степеней свободы (далее КЧСС).

"Основной метод расчета нелинейных систем, используемый в работе, основан

на применении передаточных (далее ПФ) и импульсных переходных (далее ИПФ) функций".

Уравнения движения сводятся к системам нелинейных интегральных уравнений, которые решаются шаговым методом по времени с итерациями на каждом шаге. Как и в линейных задачах, решения записываются сразу относительно обобщенных координат.

Общая теория расчета линейных систем методами, основанными на ПФ и ИПФ и их связи, дана проф. Солодовниковым В.В. "Применительно к расчету систем с КЧСС и, в частности, систем виброзащиты, метод развит проф. Черновым Ю.Т. При построении решений в отличие от традиционного метода "нормальных форм" отпадает необходимость в построении собственных форм, записи и решении уравнений в главных координатах и обратном переходе к обобщенным координатам".

Целью диссертационной работы является: разработка методов расчета и исследование систем виброизоляции с линейными и нелинейными характеристиками.

Задачи диссертационной работы: в соответствии с поставленной целью были сформулированы и решены следующие задачи:

1. запись линейных и нелинейных уравнений движения, вывод необходимых расчетных зависимостей ряда систем виброизоляции как линейных и нелинейных систем с одной и двумя степенями свободы (далее ОСС и ДСС);
2. разработка методов, алгоритмов и программ расчета ряда систем виброизоляции как линейных и нелинейных систем с ОСС и ДСС в эксплуатационных и переходных режимах:
 - линейной системы при произвольных воздействиях;
 - массивного виброизолированного объекта при произвольном смещении основания;

- нелинейной системы с дополнительной опорной связью при гармонических и ударных воздействиях;
 - нелинейной системы с демпфером вязкого трения при гармонических и ударных воздействиях;
3. построение "амплитудно-частотных характеристик" (далее АЧХ) систем с нелинейным гасителем;
 4. анализ эффективности виброзащитных систем на примерах расчета: грохота как системы с ОСС и ДСС при действии гармонической нагрузки; молота - при ударном воздействии;
 5. разработка алгоритмов расчета линейных и нелинейных виброзащитных систем как систем с тремя степенями свободы.

Методы исследования: при исследовании был выполнен анализ нормативной и научно-технической литературы по теме: виды, конструктивные решения, расчет и анализ систем виброзащиты. В качестве основного был выбран метод, основанный на использовании ПФ и ИПФ линейных систем (нетрадиционный метод "нормальных форм"). При расчете использовались системы компьютерной математики - Matlab.

Научная новизна:

- разработан метод расчета, выведены расчетные зависимости и составлены алгоритмы расчета виброзащитных систем с нелинейными характеристиками (дополнительной опорной связью, демпфером вязкого трения) с использованием ПФ и ИПФ как систем с ОСС и ДСС;
- разработан метод расчета горизонтально-вращательных колебаний массивных тел при произвольных кинематических воздействиях (плоская задача);
- построены АЧХ системы с динамическим гасителем колебаний как системы с 3-мя степенями свободы методом, основанным на специальном

выборе порождающих уравнений.

Достоверность работы - в работе использовались строгие математические методы. Проводилось сравнение с эталонными примерами.

Практическая значимость работы - с помощью формул и алгоритмов расчета, разработанных в работе, можно оценить и получить оптимальные параметры систем виброзащиты на практике.

Личный вклад автора состоит:

- 1) в детализации методов расчета, выводе расчетных зависимостей и составлении алгоритмов расчета виброзащитных систем с нелинейными характеристиками с использованием ПФ и ИПФ как систем с ОСС и ДСС;
- 2) в сравнении и анализе перемещений различных типов виброзащитных систем, в частности, при оценке влияния длительности режимов пуска и остановки и зон включения дополнительных элементов на величины перемещений в переходных режимах;
- 3) в составлении алгоритмов и программ расчета систем с демпфером вязкого трения;
- 4) в разработке метода расчета горизонтально-вращательных колебаний массивных тел при произвольных кинематических воздействиях (плоская задача);
- 5) в построении АЧХ системы с динамическим гасителем колебаний как системы с 3-мя степенями свободы методом, основанным на специальном выборе порождающих уравнений;
- 6) в разработке алгоритмов расчета линейных и нелинейных виброзащитных систем как систем с тремя степенями свободы.

Отдельные результаты работы докладывались на XIX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистров, аспирантов и молодых ученых (27-29 апреля 2016 г., Москва); XX

Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистров, аспирантов и молодых ученых (26-28 апреля 2017 г., Москва); XXI Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистров, аспирантов и молодых ученых (25-27 апреля 2018 г., Москва).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 работ, в том числе 4 в научных журналах, входящих в список ВАК для публикации результатов по кандидатским диссертациям, и 2 статьи проиндексированы в международной базе Scopus.

На защиту выносятся:

- разработанные методы, алгоритмы и программы расчета виброзащитных систем, в том числе, с нелинейными характеристиками: с дополнительной связью, с демпфером вязкого трения;
- вычисление и анализ перемещений в пуско-остановочных режимах в линейных и нелинейных системах, в том числе, в зависимости от длительности режимов пуска и остановки;
- оценка влияния размеров зазора (зоны включения дополнительных элементов) на амплитуды колебаний в пуско-остановочных режимах в нелинейных виброзащитных системах;
- результаты анализа эффективности некоторых систем виброзащиты с ограничителем колебаний и демпфером вязкого трения;
- метод, алгоритм, программа расчета плоских колебаний виброизолированного массивного тела при произвольном смещении основания;
- результаты расчета нелинейной системы с 3-мя степенями свободы, включая построение АЧХ, методом, основанным на специальном выборе порождающих уравнений.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 83 наименований и 1 приложения. Общий объем диссертации составляет 117 страниц, в текст включены 32 рисунка и 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи работы, научная новизна и практическая ценность выполненных исследований.

В первой главе приводятся вывод и основные зависимости для расчета некоторых схем виброзащиты, основанные на работах Солодовникова В.В. (общий метод) и работах Чернова Ю.Т. применительно к расчету систем виброзащиты, как систем с КЧСС.

Метод и алгоритм расчета проиллюстрирован на примерах некоторых систем с КЧСС (вертикальные и горизонтальные колебания систем с ДСС, плоские колебания массивного тела). Приводятся формулы для ПФ и ИПФ. В формулах для гармонических колебаний предлагаются варианты учета диссипативных систем.

Вторая глава содержит метод расчета линейных систем виброзащиты в эксплуатационных и переходных режимах. Полученные расчетные зависимости для линейных систем используются в дальнейшем при построении методов и алгоритмов расчета нелинейных систем.

Даны алгоритмы расчета систем с ОСС и ДСС (рисунок 1) при периодических (гармонических) и импульсных воздействиях.

При расчете систем с периодическими воздействиями в переходных режимах решения записываются, используя ИПФ, приведенные, в частности, в первой главе.

$$k_{nij} = N_1 \sum_{r=1}^2 (-1)^{r+1} \frac{\Phi_{ij}}{p_r^*} e^{-\frac{\gamma}{2} p_r t} \sin p_r^* t \quad (i, j = 1, 2) \quad (1)$$

- ИПФ массы m_i ,

$$\text{где } N_1 = \frac{1}{m_1 m_2 (p_2^2 - p_1^2)}; \Phi_{11} = k_1 + k_2 - m_2 p_1^2; \Phi_{12} = \Phi_{21} = k_1; \Phi_{22} = k_1 - m_1 p_1^2. \quad (2)$$

$$y_{ij} = \sum_{j=1}^n \int_0^t q_j(\tau) k_{nij}(t-\tau) d\tau \quad (i, j = 1, 2) \quad (3)$$

- перемещения массы m_i при действии нагрузки q_j .

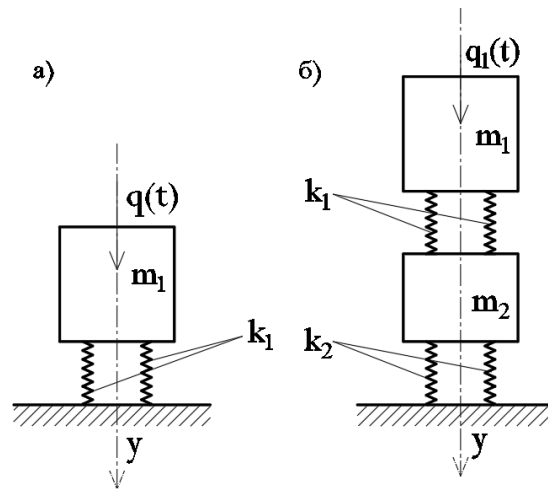


Рисунок 1 – а) традиционная система с ОСС; б) двухмассовая схема виброизоляции, которую можно рассматривать также как систему с гасителем.

Также, используя ПФ и ИПФ, в работе разработан метод расчета плоских колебаний массивных виброизолированных тел при произвольном смещении основания (см. рисунок 2).

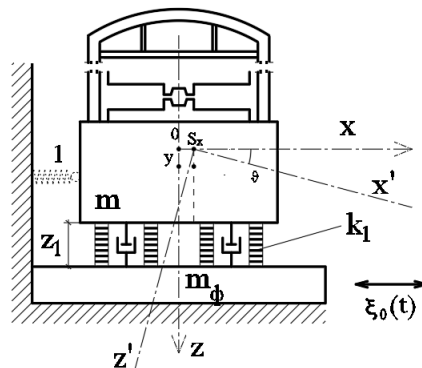


Рисунок 2 – Конструктивная схема массивного виброизолированного объекта

Система трех уравнений движения плоских колебаний при горизонтальном смещении основания имеет вид:

$$\begin{aligned} m_0 \ddot{s}_z + k_z s_z - k_{zx} v_y &= 0; \\ m_0 \rho_y^2 \ddot{v}_y + k_{zx} s_z + k_v v_y - k_{xz} s_x &= 0; \\ m_0 \ddot{s}_x - k_{xz} v_y + k_x s_x &= -m_0 \ddot{\xi}_0. \end{aligned} \quad (4)$$

Были получены ИПФ, определяющие горизонтальное смещение центра масс s_x и угол поворота v_y относительно оси Oy в виде:

$$k_{\text{ив}} = \frac{E \lambda_{xz\rho}}{p_2^2 - p_1^2} \sum_{r=1}^2 (-1)^{r+1} \cdot p_r e^{-\frac{\gamma_r}{2} p_r t} \sin p_r^* t; \quad (5)$$

$$k_{\text{ис}} = \frac{E}{p_2^2 - p_1^2} \sum_{r=1}^2 (-1)^{r+1} \frac{N(\lambda_x p_r^2)}{p_r^*} \cdot e^{-\frac{\gamma}{2} p_r t} \sin p_r^* t; \quad (6)$$

$$\text{где } p_r^* = \left[p_r^2 \left(1 - \frac{\gamma_r^2}{4} \right) \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Формулы для вычисления горизонтального смещения центра масс s_x и угла поворота v_y при произвольном смещении основания $\xi_0(t)$ запишем с помощью (5) и (6):

$$s_x(t) = \xi_0(\tau) k_{\text{ис}}(t-\tau) d\tau = \frac{E}{p_2^2 - p_1^2} \int_0^t \xi_0(\tau) \sum_{r=1}^2 (-1)^{r+1} \frac{N(\lambda, p_r^2)}{p_r^*} e^{-\frac{\gamma}{2} p_r(t-\tau)} \sin p_r^*(t-\tau) d\tau; \quad (7)$$

$$v_y(t) = \xi_0(\tau) k_{\text{ив}}(t-\tau) d\tau = \frac{E \lambda_{xz\rho}}{p_2^2 - p_1^2} \int_0^t \xi_0(\tau) \sum_{r=1}^2 (-1)^{r+1} e^{-\frac{\gamma}{2} p_r(t-\tau)} \sin p_r^*(t-\tau) d\tau. \quad (8)$$

Для простоты вычисления интегралов (7,8) ИПФ разделяют на части, зависящие исключительно от t или τ . В частности, (8) можно записать в виде:

$$s_x(t) = \frac{E}{p_2^2 - p_1^2} [d_1(t) F_2(t) - d_2(t) F_1(t)]; \quad (9)$$

$$d_1(t) = e^{-\eta t} \sin p_1 t; \quad d_2(t) = e^{-\eta t} \cos p_1 t; \quad (10)$$

$$F_1(t) = \int_0^t \xi_0(\tau) \cdot e^{\eta \tau} \sin p_1^* \tau d\tau; \quad F_2(t) = \int_0^t \xi_0(\tau) \cdot e^{\eta \tau} \cos p_1^* \tau d\tau. \quad (11)$$

В **третьей главе** приведены методы и алгоритмы расчета нелинейных систем виброзащиты в эксплуатационном и переходных режимах.

Метод и алгоритмы расчета нелинейных систем с ОСС и ДСС (рисунок 3) с ограничителем колебаний при периодических (гармонических) и при импульсных воздействиях.

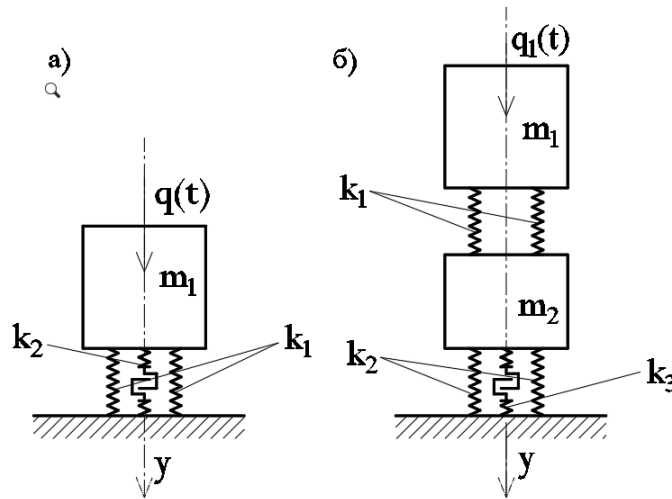


Рисунок 3 – Система: а) с ОСС с ограничителем перемещений; б) с ограничителем перемещений нижней массы (m_2)

Система с ОСС. Уравнение движения нелинейной системы имеет вид:

$$m\ddot{y} + \left(1 + 2v \frac{d}{dt}\right) c(y)y = q(t). \quad (12)$$

При нелинейной зависимости "реакции – перемещения" вида:

$$c(y)y = k_1 y \text{ при } y \leq y_0;$$

$$c(y)y = k_1 y_0 + (k_1 + k_2)(y - y_0) \text{ при } |y| > y_0; \quad (13)$$

уравнение (12) преобразуется в

$$\ddot{y} + \left(1 + 2v \frac{d}{dt}\right) p_1^2 y = \frac{q(t)}{m} - \left(1 + 2v \frac{d}{dt}\right) \frac{k_2(y - y_0)}{m}, \text{ где } p_1^2 = \frac{k_1}{m_1}. \quad (14)$$

Решение уравнения (14) представляется в виде суммы двух решений: линейной системы на внешнюю нагрузку ($y_{л}$) и на т.н. фиктивную нагрузку, которая зависит от вида нелинейности ($y_{нл}$):

$$y = y_n - y_{нл}. \quad (15)$$

Нелинейная составляющая решения определяется из интегрального уравнения

$$y_{нл} = \frac{1}{mp_1^*} \int_{t_0}^t \left(1 + 2v \frac{d}{dt}\right) k_2 (y - y_0) e^{-n_1(t-\tau)} \sin p_1^* (t - \tau) d\tau; \quad (16)$$

где t_0 – время первого включения дополнительной связи в процессе колебаний.

Без учета диссипации уравнение (16) преобразуется в

$$\begin{aligned} y_{нл} &= \frac{k_2}{mp_1^*} \int_{t_0}^t (y - y_0) e^{-n_1(t-\tau)} (\sin p_1^* t \cos p_1 \tau - \cos p_1^* t \sin p_1^* \tau) d\tau = \\ &= \frac{k_2}{mp_1^*} [d_1(t)F_2(t_0, t) - d_2(t)F_1(t_0, t)]; \end{aligned} \quad (17)$$

$$\text{где } F_2(t_0, t) = \int_{t_0}^t \lambda_1(y \mp y_0) \cdot e^{n_1 \tau} \cos p_1^* \tau d\tau; \quad F_1(t_0, t) = \int_{t_0}^t \lambda_1(y \mp y_0) \cdot e^{n_1 \tau} \sin p_1^* \tau d\tau. \quad (18)$$

Знак «+» в (18) при $y(t) \leq 0$. λ_1 – прерывистая функция, равная 0 при $|y| \leq |y_0|$ и 1 при $|y| > |y_0|$.

Уравнение (15) решается пошагово по времени с итерациями на каждом шаге.

Система с ДСС. Уравнения движения системы имеют вид:

$$\begin{aligned} m\ddot{y}_1 + \left(1 + 2v_1 \frac{d}{dt}\right) k_1 (y_1 - y_2) &= q_1(t); \\ m\ddot{y}_2 - \left(1 + 2v_1 \frac{d}{dt}\right) k_1 (y_1 - y_2) + \left(1 + 2v_2 \frac{d}{dt}\right) c_2 (y_2) y_2 &= 0. \end{aligned} \quad (19)$$

Второе уравнение системы (19) перепишем в виде:

$$m\ddot{y}_2 - \left(1 + 2v_1 \frac{d}{dt}\right) k_1 (y_1 - y_2) + \left(1 + 2v_2 \frac{d}{dt}\right) k_2 y_2 = \left(1 + 2v_2 \frac{d}{dt}\right) [k_2 - c(y_2)] y_2. \quad (20)$$

Для принятого типа нелинейности зависимость "реакции – перемещения":

$$c(y_2) y_2 = R(y) = k_2 y_2 \quad \text{при } |y| \leq y_0; \quad (21)$$

$$c(y_2) y_2 = R(y) = k_2 y_0 + (k_2 + k_3)(y_2 - y_0) \quad \text{при } |y| > y_0. \quad (22)$$

$$\text{Обозначим } f_2 = \left(1 + 2v_2 \frac{d}{dt}\right) k_3 (y_2 - y_0).$$

При решении системы (19) следует воспользоваться ИПФ для линейной

системы (1) и с помощью выражения (3) можно записать, в частности:

$$y_{нл12} = y_{нл21} = \sum_{r=1}^2 \int_0^t f(\tau) k_{нл2} e^{n_r(t-\tau)} \sin p_r^*(t-\tau) d\tau; \quad (23)$$

где $f(\tau)$ - фиктивная нагрузка; $k_{нл2}$ - ИПФ по (1);

$$y_{нл12} = N_1 \sum_{r=1}^n \int_0^t \lambda_1 k_3 (y_2 \mp y_0) (-1)^{r+1} \frac{k_1}{p_r^*} e^{n_r(t-\tau)} \sin p_r^*(t-\tau) d\tau; \quad (24)$$

$$= N_1 \sum_{r=1}^2 \left[(-1)^{r+1} \frac{k_1}{p_r^*} (H_{2r}(t) d_{1r} - H_{1r}(t) d_{2r}) \right]; \quad (25)$$

также по аналогии с (25) можно записать $y_{нл11}$ и $y_{нл22}$ так

$$y_{нл22} = N_1 \sum_{r=1}^2 (-1)^{r+1} T_{22r} [d_{1r} H_{2r}(t) - d_{2r} H_{1r}(t)]; \quad (26)$$

$$y_{нл11} = N_1 \sum_{r=1}^2 \left\{ (-1)^{r+1} T_{11r} [d_{1r} F_{2r}(t) - d_{2r} F_{1r}(t)] \right\}; \quad (27)$$

$$T_{22r} = \frac{k_1 - m_1 p_r^2}{p_r^*}; T_{11r} = \frac{k_1 + k_2 - m_2 p_r^2}{p_r^*}; \quad (28)$$

$$d_{1r} = e^{-n_r t} \sin p_r t; d_{2r} = e^{-n_r t} \cos p_r t; \text{ где } 2n_r = \nu_r p_r^2, p_r^* = \sqrt{p_r^2 - n_r^2}; \quad (29)$$

$$F_{1r}(t) = \int_0^t q(\tau) \cdot e^{n_r \tau} \sin p_r^* \tau d\tau; F_{2r}(t) = \int_0^t q(\tau) \cdot e^{n_r \tau} \cos p_r^* \tau d\tau. \quad (30)$$

В формулах (25,26) подынтегральные функции H_{ir} определяют фиктивную нагрузку, связанную с нелинейностью:

$$H_{1r} = \int_0^t \lambda_1 k_3 (y_2 \mp y_0) e^{n_r \tau} \sin p_r^* \tau d\tau; H_{2r} = \int_0^t \lambda_1 k_3 (y_2 \mp y_0) e^{n_r \tau} \cos p_r^* \tau d\tau. \quad (31)$$

Метод и алгоритмы расчета нелинейных систем с демпферами вязкого трения.

Такие системы часто используются в машиностроительных конструкциях, в виброзащитных системах в строительных конструкциях. Включение таких элементов с высоким уровнем диссипативных сил значительно снижает амплитуды колебаний в переходных режимах при переходе через резонанс.

Расчетные схемы систем виброизоляции с демпферами вязкого трения как систем с ОСС и ДСС даны на рис. 4.

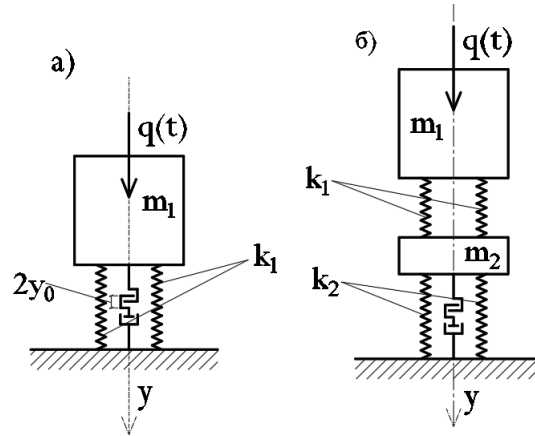


Рисунок 4 – Система: а) с ОСС с демпфером вязкого трения б) с ДСС с демпфером вязкого трения

Система с ОСС. Уравнение движения имеет вид:

$$\ddot{y} + \bar{h}(y)\Phi_d \dot{y} + \left(1 + \frac{\gamma_1}{p_1} \frac{1}{dt}\right) p_1^2 y = \frac{q(t)}{m}; \quad (32)$$

где $\Phi_d = p_1 \gamma_d$ - модуль затухания; γ_d - условный коэффициент потерь (неупругого сопротивления); γ_1 - коэффициент неупругого сопротивления для виброизоляторов, принятый в соответствии с модифицированной гипотезой Фойгта; $p_1 = \left(\frac{k_1}{m}\right)^{1/2}$ - собственная круговая частота системы; $\bar{h}(y)$ - прерывистая функция, равная 1 при $|y| \geq y_0$; 0 при $|y| < y_0$.

Сведем уравнение (32) к нелинейному интегральному уравнению, перенеся нелинейный член в правую часть, и запишем общее решение в виде интеграла Дюамеля:

$$y = \int_0^t q(\tau) V_0(p_1, t - \tau) d\tau - \bar{h} \Phi_d \int_0^t \frac{dy}{d\tau} y(\tau) V_0(p_1, t - \tau) d\tau; \quad (33)$$

где первый интеграл - решение линейного уравнения;

$$V_0 = \frac{1}{m_1 p_1} e^{-nt} \sin pt, \text{ где } n = \frac{\gamma}{2} p_1, \quad (34)$$

- ИПФ линейной системы.

Второй интеграл в (33) вычислим по формуле:

$$y_H = J_d = \bar{h}(y) \Phi_d \left[\left(d_1 + \frac{n_1}{p_1} d_2 \right) F_{1d}(t) + \left(d_2 - \frac{n_1}{p_1} d_1 \right) F_{2d}(t) \right]; \quad (35)$$

где $d_1 = e^{-nt} \sin p_1 t$; $d_2 = e^{-nt} \cos p_1 t$;

$$F_{1d}(t) = \int_0^t y(\tau) \cdot e^{n\tau} \sin p_1^* \tau d\tau; F_{2d}(t) = \int_0^t y(\tau) \cdot e^{n\tau} \cos p_1^* \tau d\tau. \quad (36)$$

Перемещения системы - сумма перемещений от внешней и фиктивной нагрузки

$$y = y_n + y_n(J_d).$$

Система с ДСС. В частности, уравнения движения системы с ДСС с демпфером вязкого трения удобно записать так:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1 + \left(1 + 2n_1 \frac{d}{dt} \right) k_1 (y_1 - y_2) &= \frac{q(t)}{m}; \\ m_2 \ddot{y}_2 + \left(1 + 2n_1 \frac{d}{dt} \right) k_1 (y_1 - y_2) + \left(1 + 2n_2 \frac{d}{dt} \right) k_2 y_2 &= \bar{h}(y_2) \Phi_d \dot{y}_2. \end{aligned} \quad (37)$$

Уровень воздействий на опорную конструкцию определяется перемещением $y_2(t)$, которое можно вычислить, воспользовавшись ИПФ $k_{21}(t)$ (от внешней нагрузки) и $k_{22}(t)$ - от фиктивной нагрузки ($\bar{h}(y_2) \Phi_d \dot{y}_2$):

$$y_2 = \int_0^t q(\tau) \sum_{s=1}^2 \frac{F_s(p_s, \gamma, t - \tau)}{p_s} d\tau + \bar{h}(y_2) \Phi_d \int_0^t \sum_{s=1}^2 \frac{d}{d\tau} [y(\tau)] \frac{1 - \frac{p_s^2}{p_0^2}}{p_s} F_s(p_s, \gamma, t - \tau) d\tau. \quad (38)$$

Второй интеграл в (38) следует вычислять по частям, воспользовавшись зависимостями (35, 36).

В четвертой главе по материалам второй и третьей глав выполнены расчеты и даны оценки эффективности ряда систем виброзащиты как с линейными характеристиками, так и с дополнительными элементами, расчетные схемы которых - нелинейные системы с ОСС и ДСС.

Параметры расчета рассмотренных систем виброзащиты приведены в этой главе диссертации.

Плоские колебания массивных виброизолированных тел при произвольном смещении основания.

Расчетные зависимости (7,8). Графики по результатам расчета даны на рис. 5 и 6.

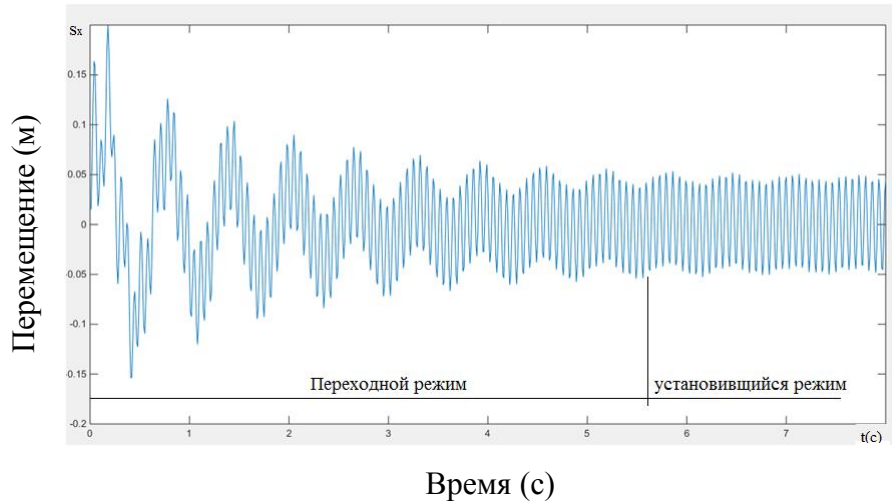


Рисунок 5 – Горизонтальное смещение центра масс s_x

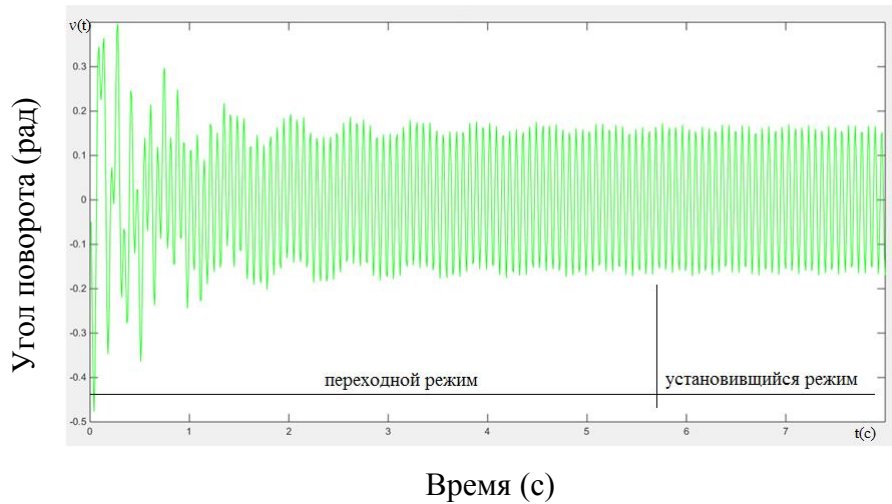
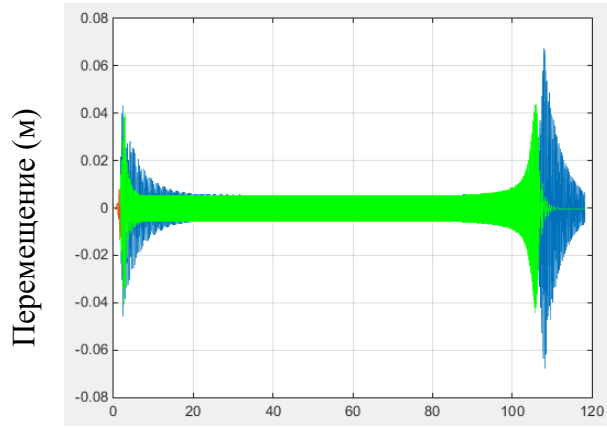


Рисунок 6 – Угол поворота $v_y(t)$ относительно оси Oy

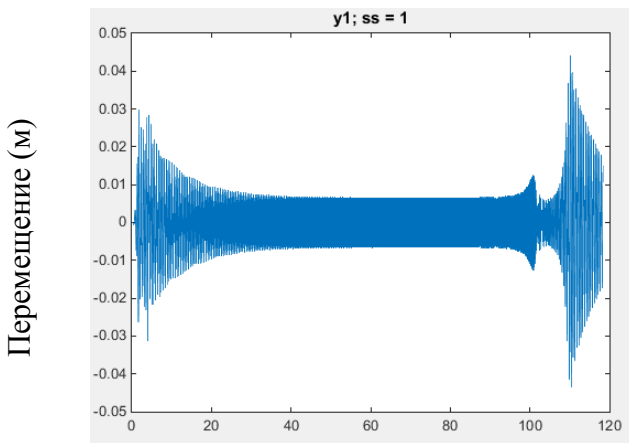
Нелинейные системы с ОСС и ДСС с ограничителями колебаний

Расчетные зависимости - (15-18); (23-31). Графики перемещений в системах с ОСС и ДСС даны на рис. 7-9.



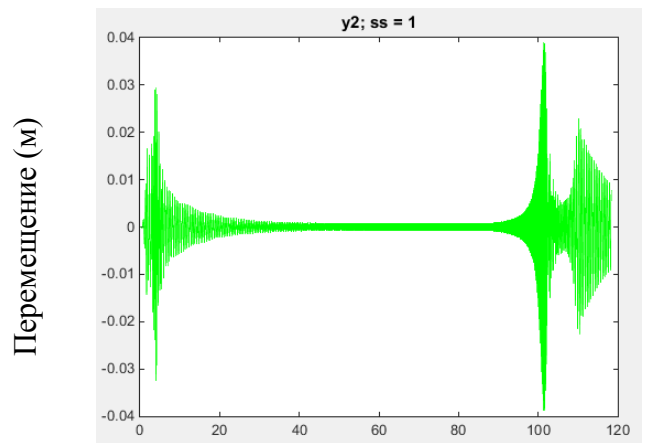
Время (с)

Рисунок 7 – Перемещения в традиционной системе (вариант 1) (синее) и с дополнительной связью (вариант 3) (зеленое)



Время (с)

Рисунок 8 – Перемещения массы m_1 системы 3



Время (с)

Рисунок 9 – Перемещения дополнительной массы m_2 системы 3

Системы с демпфером вязкого трения.

Расчетные зависимости (33-36).

Перемещения системы с ОСС с демпфером вязкого трения показаны на рис. 10.

В пятой главе дан расчет систем с нелинейным гасителем методом, основанным на специальном выборе линейных порождающих систем. Проведенные расчеты подтвердили в определенной степени и удачный выбор принятого метода расчета.

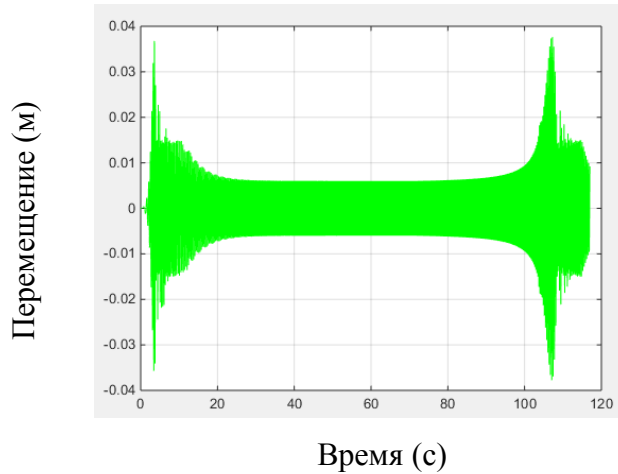


Рисунок 10 – Перемещения в системе с демпфером вязкого трения с $\gamma_d = 0,21$

Построены АЧХ нелинейных систем с КЧСС (при одной нелинейной связи) с использованием указанного метода. Рассмотрены две расчетные схемы.

Первая схема - система с 3-мя степенями свободы, представляющая собой этажерку (масса m_2) с установленным на ней динамическим оборудованием (масса m_1). Масса m_3 в этой системе – нелинейный гаситель (рисунок 11).

Вторая расчетная схема - система с 3-мя степенями свободы (рисунок 12).

Система представляет собой этажерку (масса m_3), на которой установлено оборудование (масса m_2) с нелинейным гасителем m_1 .

Система уравнений движения такой системы имеет вид:

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + \left(1 + 2\nu_1 \frac{d}{dt}\right) k_1 (x_1 - x_2) = -m_1 \frac{d^2 \xi(t)}{dt^2}; \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} - \left(1 + 2\nu_1 \frac{d}{dt}\right) k_1 (x_1 - x_2) + \left(1 + 2\nu_2 \frac{d}{dt}\right) k_2 x_2 + \left(1 + 2\nu_3 \frac{d}{dt}\right) c_3 (x_2 - x_3) = -m_2 \frac{d^2 \xi(t)}{dt^2}; \\ m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} - \left(1 + 2\nu_3 \frac{d}{dt}\right) c_3 (x_2 - x_3) = 0. \end{cases} \quad (39)$$

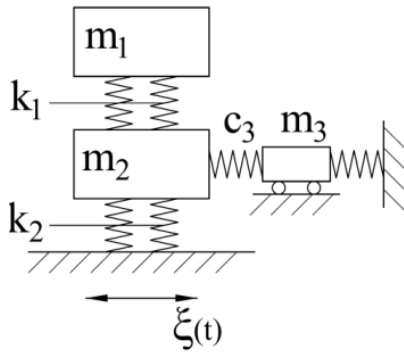


Рисунок 11 – Расчетная схема 1 системы с ДСС с дополнительным гасителем

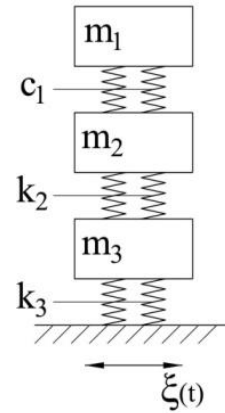


Рисунок 12 – Расчетная схема системы 2 с 3-мя степенями свободы

Реакция в связи, присоединяющей гаситель, определяется в соответствии с зависимостью:

$$c_3(x_2 - x_3) = k_n \left(1 + \alpha(x_2 - x_3)^2\right)(x_2 - x_3). \quad (40)$$

В первом приближении перемещения масс определяем по формулам:

$$x_{i,1}(t) = x_{i,0}(t) - h_i(t), \quad (41)$$

$$\text{где } h_i(t) = \sum_{j=1}^3 \int_0^t f_j(t) V_{ij}(t - \tau) d\tau. \quad (42)$$

Далее определяются амплитуды колебаний масс системы с учетом затухания по формуле:

$$X_{i,0} = -\frac{\xi_0}{B} \sum_{s=1}^3 \frac{C_i(p_s) \cdot R(s)}{p_s^2 A_s}, \quad i = 3, \quad (43)$$

$$\text{где } B = m_1 m_2 m_3 (p_3^2 - p_2^2)(p_3^2 - p_1^2)(p_2^2 - p_1^2);$$

$C_i(p_s)$ – вспомогательные функции;

p_s – собственные частоты системы;

$$R(s) = p_{1+\text{Rem}(s,3)}^2 - p_{1+\text{Rem}(s+1,3)}^2;$$

$\text{Rem}(s, 3)$ – остаток от деления номера собственной формы s на 3;

$$A_s = \sqrt{\left(1 - \omega^2 / p_s^2\right)^2 + \gamma_s^2};$$

γ_s – коэффициенты демпфирования, соответствующие собственным формам.

Полученные амплитуды перемещений масс m_2 и m_3 представлены на рисунках 13 и 14.

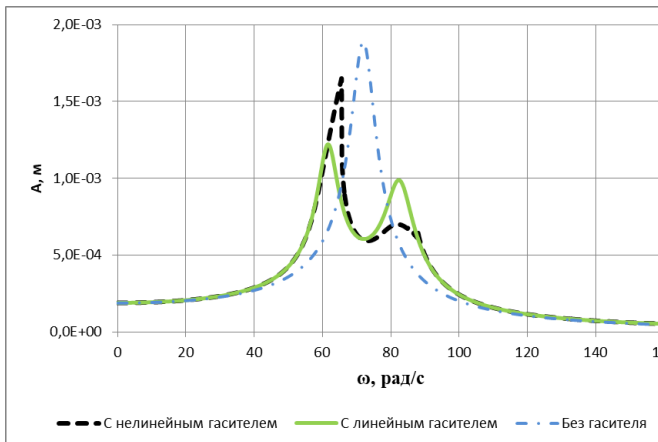


Рисунок 13 – АЧХ для нижних масс систем: с нелинейным гасителем (черная пунктирная линия); с линейным гасителем (зеленая сплошная линия); без гасителя (синяя штрихпунктирная линия)

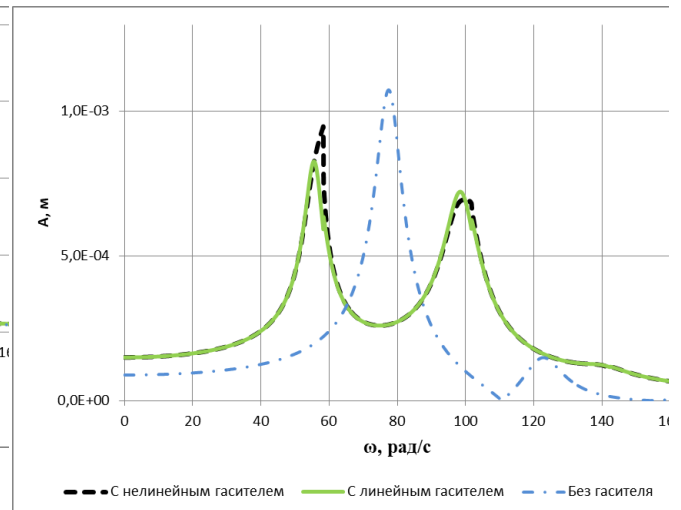


Рисунок 14 – АЧХ для нижних масс систем: с нелинейным гасителем (черная пунктирная линия); с линейным гасителем (зеленая сплошная линия); без гасителя (синяя штрихпунктирная линия)

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Основной метод, который был принят в работе, основан на ПФ и ИПФ линейных динамических систем и их взаимной связи.
2. Этот метод, общие положения которого даны в работе Солодовникова В.В. и который был развит применительно к расчету систем с КЧСС

Черновым Ю.Т., позволил получить достаточно просто необходимые зависимости и алгоритмы расчета линейных динамических систем с КЧСС, а также систем с дополнительными элементами, цель которых – снижать уровни колебаний в переходных режимах при прохождении через резонанс. Расчетные схемы таких систем - системы с нелинейными характеристиками.

3. По существу, этот метод можно определить как модифицированный метод "нормальных форм", в котором, по сравнению с традиционным методом, сокращается целый ряд процедур.
4. Подходы и методы расчета основаны на общих положениях теории ПФ и ИПФ и позволили рассмотреть и проиллюстрировать на конкретных примерах расчета широкий класс линейных и нелинейных систем виброзащиты.
5. При расчете нелинейных систем виброизоляции основное внимание уделялось методам расчета и алгоритмам, связанным с расчетами в переходных режимах, и, в том числе, оценке влияния дополнительных элементов (блоков) на снижение уровней колебаний в эксплуатационных и переходных режимах и, в частности:
 - при расчете грохота с промежуточным блоком, что позволяет значительно снижать нагрузку на основание;
 - при расчете машин ударного действия, также с дополнительными блоками, которые влияют на характер колебаний и на величину нагрузки на основание при импульсных воздействиях.
6. Был предложен метод и алгоритм расчета достаточно общей задачи о плоских колебаниях виброизолированных массивных тел при произвольном смещении основания. Дан пример расчета.

7. Удобные и компактные выражения и расчетные формулы, полученные для линейных систем, позволили построить достаточно удобные и хорошо сходящиеся алгоритмы расчета нелинейных систем, а именно, систем с дополнительными элементами.
8. Были рассмотрены нелинейные задачи расчета систем виброизоляции как систем с КЧСС с дополнительными элементами, которые включаются в систему виброизоляции при больших перемещениях (в зонах повышенных уровней колебаний), которые связаны с прохождением через резонанс.
9. Рассматривалась и оценивалась эффективность виброизоляции нелинейных систем:
 - показано, что введение дополнительных связей при прохождении через резонанс машин с вращающимися частями позволяет снижать уровень колебаний в переходных режимах в системе с ОСС на 50 %; для системы с ДСС основное снижение было связано с включением дополнительного блока;
 - при виброизоляции машин ударного действия также наибольший эффект связан с введением дополнительного блока.
10. Рассматривались системы виброизоляции, где в качестве дополнительного элемента применялся демпфер вязкого трения. Влияние демпфера вязкого трения оценивалось по форме близкой к модифицированной гипотезе Фойгта, однако при значительно больших значениях коэффициента $\gamma_{пр}$.
 - Как показали результаты расчета, при периодических нагрузках как для системы с одной, так и для системы с ДСС при включении демпфера вязкого трения значительно, на 30%-70%, снижаются перемещения в переходных режимах.

11. При использовании для расчета нелинейных систем приближенных методов, в частности, при построении АЧХ для систем с дополнительными нелинейными связями, достаточно удачным оказался способ, предложенный Ю.Т. Черновым, основанный на специальном выборе порождающей системы. С помощью этого метода рассмотрены две системы с нелинейными гасителями, получены решения и построены АЧХ.

Основные положения диссертации и результаты исследований опубликованы в следующих публикациях:

В периодических изданиях, включенных в перечень рекомендованных ВАК РФ:

1. Чернов Ю.Т., Зебилина М.Д.Х. Расчет систем виброизоляции оборудования, в том числе, с нелинейными характеристиками // Строительная механика и расчет сооружений. –2017. –№ 4 (273). – С. 47-54.
2. Чернов Ю.Т., Зебилина М.Д.Х. Виброизоляция машин ударного действия с нелинейными элементами // Бюллетень Строительной Техники. –2018. –№ 1 (1001). – С. 46-48.
3. Чернов Ю.Т., Зебилина М.Д.Х. к расчету систем виброизоляции с демпферами вязкого трения // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. –2018. – №2. – С. 34-38.
4. Чернов Ю.Т., Зебилина М.Д.Х. Плоские колебания массивного тела при смещении основания // Основания, фундаменты и механика грунтов. –2018. – № 3. – С. 18-22.

Статьи, опубликованные в изданиях, цитируемых международными базами Scopus и Web of Science:

5. Zebilila Mohammed, Chernov Jury. Vibration isolation systems, considered as systems with single degree of freedom. XXVI R-S-P Seminar on Theoretical Foundation of Civil Engineering. MATEC Web of Conferences. 2017. Volume 117. No. 00181.
6. Yury Chernov, Maria Volkova and Mohammed Zebilila Analysis of systems with nonlinear auxiliary mass dampers by means of a special selection of linear generating functions. XXI International scientific conference on advanced in Civil Engineering. Construction the formation of living environment. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Volume 365. Issue 4. No. 042053.

Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях:

7. Зебилина М.Д.Х. Расчет виброзащитных систем с нелинейными элементами // Строительство – формирование среды жизнедеятельности [Электронный ресурс] : сборник материалов XIX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. Москва. – 2016.– С. 281-285. – Режим доступа:
<http://mgsu.ru/news/Nauka/SbornikStroitelstvoformirovaniesredyzhiznedeyatelnoosti2016/>.
8. Зебилина М.Д.Х. Системы виброзащиты, рассматриваемые как системы с одной степенью свободы // Строительство – формирование среды жизнедеятельности [Электронный ресурс] : сборник материалов XX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. Москва. – 2017. – С. 293-295. – Режим доступа: <http://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/32393/>.