

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Зебилилы Мохаммеда Диин-Халиса на тему: «Расчет и оценка эффективности систем виброизоляции с линейными и нелинейными характеристиками», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.17 – Строительная механика

Виброизоляция, как один из наиболее эффективных способов борьбы с вибрациями широко используется в машиностроении, на строительных объектах и многих других областях промышленности.

Конструкции систем виброизоляции и их расчет детально рассмотрены в технической и нормативной литературе.

Некоторые нетрадиционные варианты систем виброзащиты указаны в работе.

Однако, в большинстве работ расчет уровней колебаний и оценка эффективности виброизоляции даются применительно к рабочим режимам виброактивного оборудования.

Вместе с тем значительные колебания, возбуждаемые в переходных режимах (при пуске и остановке) при прохождении через резонанс могут приводить к серьезным последствиям, как-то: нарушению работы оборудования, повреждению трубопроводов, повреждению элементов.

Хотя по нормативным документам такой расчет является обязательным, в литературе методы расчета и оценки эффективности систем с учетом возможных последствий при переходных режимах представлены недостаточно. Практически не рассмотрены в литературе методы расчета систем, в которых возможно ограничение уровней колебаний в резонансных зонах.

Одни из наиболее эффективных способов - введение дополнительных элементов (связей, демпферов), которые включаются в работу системы при повышенных уровнях вибраций.

Жесткостные характеристики становятся нелинейными и расчет сводится к расчету нелинейных систем с конечным числом степеней свободы, с которым автор успешно справился. Принятый и развитый в работе метод и построенные алгоритмы позволяют получить решение с заданной точностью и исследовать влияние отдельных параметров (интегралов времени переходных режимов, условий включения дополнительных связей и т.п.) на эффективность систем.

Практическая значимость (при проектировании систем виброзащиты) не вызывают сомнений.

На наш взгляд, поставленные задачи и полученные результаты несомненно свидетельствуют о актуальности работы.

### **Краткое содержание работы**

Диссертационная работа Зебилилы М. Д. Х. состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 83 наименования, и 1 приложения. Работа изложена на 117 страницах машинописного текста, содержит 32 рисунка и 6 таблицы.

**Во введении** диссертации обосновывается актуальность темы исследования, цель и задачи исследования. Отмечены научная новизна исследования, теоретическая и практическая значимость, личный вклад автора, апробации результатов работы, публикации автора.

**В первой главе диссертации** дан анализ методов расчета линейных и нелинейных систем виброизоляции. Рассмотрены: классический метод "нормальных форм" и метод, основанный на передаточных и импульсных переходных функциях линейных систем. Показано преимущество последнего, связанное с сокращением нескольких этапов расчета, в частности: построения собственных форм, их нормирования, переходы к главным координатам и, затем, к обобщенным. В главе, приведены расчетные зависимости для систем с одной и двумя степенями свободы.

Рассмотрены также некоторые конструктивные схемы систем виброизоляции. Показана эффективность применения виброзащитных систем с дополнительными элементами при снижении уровней вибрации в переходных режимах.

**Вторая глава** содержит алгоритмы расчета и выводы расчетных зависимостей для линейных систем виброизоляции как систем с одной и двумя степенями свободы с применением передаточных и импульсных переходных функции. Формулы для вычисления перемещений масс записаны в форме интеграла Дюамеля, что определяет хорошую сходимость решений при численном счете.

Также рассмотрена плоская задача расчета колебаний массивных виброизолированных тел при кинематическом возбуждении. При принятой конструктивной схеме расчет вертикальных и горизонтально-вращательных колебаний производится отдельно. Построены компактные решения для вертикальных и горизонтальных перемещений центра масс и угла поворота, составлен алгоритм и дан пример расчета.

В конце этой главы, дан алгоритм расчет систем с тремя степенями свободы при горизонтальном смещении основания.

**Третья глава** посвящена методике расчета нелинейных систем виброизоляции. Нелинейность определяется введением дополнительных элементов, таких как: связей, демпферов вязкого трения и т.п. В основе расчета, использованы формулы, полученные во второй главе. Перенос нелинейные члены в правую часть, с помощью импульсной переходной функции уравнения нелинейных колебаний сведены к системе нелинейных интегральных уравнений второго рода, которые решаются численным методом с итерациями на каждом шаге по времени.

Получены решения для систем с одной степенью свободы с нелинейной связью и демпфером вязкого трения при периодическом (на примере работы грохота) и импульсном воздействиях (на примере работы молота). Системы с двумя степенями свободы, расчетные зависимости и

алгоритмы для которых получены в работе можно рассматривать как расчетные схемы для грохота или молота с гасителем или дополнительном блоком, с включением дополнительной линейной связи и/или демпфера вязкого трения.

**В четвертой главе** рассмотрены примеры расчета. Дан расчет систем виброизоляции грохота и молота с периодическими и импульсными нагрузками соответственно. Оценивалась эффективность 4-х систем виброизоляции: системы с одной степенью свободы - при традиционной схеме виброизоляции и с системой включающейся связью; как системы с двумя степенями свободы - с дополнительной массой и с ограничителем перемещения нижней массы. Для системы с дополнительной массой были приняты различные значения этих масс при расчете. Получены оптимальные с точки зрения снижения уровней нагрузок на основании значения масс. Варьировались значения жесткостей и получено оптимальное значение жесткости дополнительной связи.

Рассмотрено также влияния длительности времени пуска и остановки при применении 4 типов виброизоляции.

Оценивалась эффективность применения систем с одной степенью свободы с демпфером вязкого трения при различных значениях условного коэффициента демпфирования.

Дан пример расчета плоских колебаний массивных виброизолированных тел при произвольном смещении основания. Построены графики горизонтального смещения центра масс и угла поворота.

**В пятой главе** дан обзор приближенных методов расчета нелинейных систем с конечным числом степеней свободы. Рассмотрел метод гармонического баланса, гармонической линеаризации и метод, основанный на специальном выборе порождающих систем, который и выбран для расчета.

Построены амплитудно-частотные характеристики систем с тремя степенями свободы. Рассмотрены две системы с разными расположениями

масс. В первой системе первая масса (оборудование) установлена на второй массе (этажерке). Третья масса (нелинейный гаситель) присоединена к этажерке. В второй системе нелинейный гаситель присоединен к оборудованию, которое установлено на этажерке. Сравнивались уровни снижения амплитуд колебаний оборудования с линейным и нелинейным гасителями. Последний вариант более эффективен.

**В заключении** содержатся основные выводы касающиеся методов расчета линейных и нелинейных систем, основанных на использовании передаточных и импульсных переходных функций, эффективности построенных алгоритмов, результатов расчета систем виброизоляции и выводов об эффективности применения систем с дополнительными элементами.

### **Замечания**

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. На мой взгляд, недостаточно подробно освещены другие методы расчета динамических систем с конечным числом степеней свободы на произвольную нагрузку, приведенные в работе.
2. Не приведено сравнения вычислительной эффективности метода нормальных форм и предлагаемого.
3. Было бы лучше если параметры решенных задач были одинаковыми, тогда можно было, в частности, сравнить результаты систем виброизоляции с дополнительной связью и с демпфером вязкого трения.

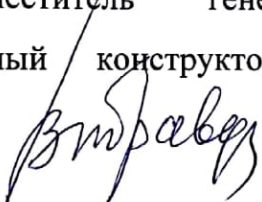
### **Заключение**

Работа является законченным научным исследованием, содержащим относительно новой, нетрадиционной в строительной механике, метод расчета систем с конечным числом степеней свободы с линейными и нелинейными характеристиками с использованием передаточных и импульсных переходных функций; постановку и решения задачи расчета линейных и нелинейных систем виброзащиты и анализ эффективности ряда

систем. Примененный автором подход с использованием переходных и импульсных переходных функций можно рассматривать как существенный вклад автора в методы решения динамических линейных и нелинейных задач. Работа выполнена на высоком научном уровне. По актуальности, научной новизне, уровню исследований, практической значимости, а также по своей структуре работа «Расчет и оценка эффективности систем виброизоляции с линейными и нелинейными характеристиками» удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатской диссертации по специальности 05.23.17 - «Строительная механика», а её автор, несомненно, заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук.

**Официальный оппонент:**

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



**Травуш Владимир Ильич**  
«22» ноября 2018 г.

Адрес: 105064, г. Москва, Нижний Сусальный переулок, д.5, стр. 5А

Тел: +7(903)9686250

Email: travush@mail.ru

*Подпись Травуша В.И. заверено.*  
*Завальский* *Винберг О.А.*



## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Зебилилы Мохаммеда Диин-Халиса на тему: «Расчет и оценка эффективности систем виброизоляции с линейными и нелинейными характеристиками», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.17 – Строительная механика

Одной из важнейших задач, возникающей при проектировании современных зданий и сооружений является учет влияния вибрационного воздействия на конструкции здания. Источником воздействия может выступать вибрирующее технологическое оборудование, движение автомобильного и железнодорожного транспорта, движение поездов метрополитена неглубокого заложения, а в сейсмоопасных регионах также и сейсмическое воздействие. В связи с этим, выбор в качестве темы диссертации задач, связанных с расчетом и оценкой эффективности систем виброизоляции является вполне актуальным и имеющим практическое значение как для развития общей теории виброзащитных систем, так и для получения практически важных расчетных зависимостей, позволяющих оценить прогнозируемую эффективность конкретной системы виброизоляции.

В работе основное внимание уделяется методу расчета динамических систем, основанному на передаточных функциях (ПФ) и импульсных переходных функциях (ИПФ). Дано его сравнение с более традиционным методом "нормальных форм".

Применяемый в работе метод позволяет, в том числе, рассматривать поведение виброзащитных систем, функционирующих в переходных режимах (пуска и остановки), что, в частности, повышает общую достоверность прогнозируемой эффективности систем виброзащиты.

### Краткое содержание работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 83 источников. Общий объем работы - 117 страниц текста, включая 32 рисунка и 6 таблиц и 1 приложения.

**Во введении** изложена и обоснована актуальность выбранного направления исследований, сформулированы цели и конкретные задачи, поставленные в работе, заявлена её научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе** приведен подробный обзор существующих литературных источников. Основное внимание уделено работам Солодовникова В.В., Чернова Ю.Т., Осиповой М.В., посвященным расчету систем с конечным числом степеней свободы. Показано, что достаточно эффективным для расчета линейных и нелинейных систем с конечным числом степеней свободы является метод передаточных (ПФ) и импульсных переходных функций (ИПФ) линейных систем. В главе приводятся основные положения "метода нормальных форм", приводится его сравнение с методом, основанном на связи передаточных функций (ПФ) и импульсных переходных функций (ИПФ). Указывается, что применение последнего позволяет упростить некоторые этапы расчета, в частности избежать явного построения собственных форм и их нормирования. В главе показано, что передаточные функции (ПФ) и импульсные переходные функции (ИПФ) связаны взаимным преобразованием Фурье.

Часть первой главы включает в себя описание различных виброзащитных систем: активной и полуактивной систем переменной жесткости. Приводятся преимущества и недостатки каждой из них, отмечается, что эффективность их работы значительно выше, чем эффективность пассивных систем виброизоляции, но стоимость и сложность их реализации также значительно выше.

В заключении первой главы приводится описание конструкций различных демпферных систем, рассматриваются демпферы вязкого трения с заполнением силиконовым маслом или битумной жидкостью, а также пружинно-демпферные системы. Показано, что демпферы вязкого трения находят широкое применение при проектировании систем сейсмоизоляции и, в ряде случаев, прошли реальную проверку своей работоспособности при сейсмических и иных динамических воздействиях на здания. В частности, демпферы вязкого трения применялись при строительстве высотных сооружений, подверженных порывистому ветру. Подобного рода демпферами оснащены здания Пекинского Интайского центра, здание Йидженюань города Хуайин и ряд других.

**Вторая глава** содержит основные зависимости для передаточных (ПФ) и импульсных переходных функций (ИПФ), используемые при решении линейных задач, в последующих главах эти зависимости используются уже при решении нелинейных задач. В главе рассматривается поведение массивных тел при произвольном смещении основания, на примере одномассовой и двухмассовой систем. Решение уравнений движения для одномассовой системы записывается в виде интеграла Дюамеля. В случае



двухмассовой системы решение для переходных режимов записывается с использованием импульсных переходных функций (ИПФ).

В главе подробно рассматриваются задачи плоских колебаний виброизолированных тел при произвольном смещении основания. В заключение второй главы рассматривается поведение линейной системы с тремя степенями свободы.

**Третья глава** содержит описание методов расчета нелинейных систем виброзащиты, в частности систем с изменяющейся жесткостью и демпфирующими элементами, которые включаются в работу в переходных режимах. В главе рассматриваются возникающие вертикальные колебания одномассовой и двухмассовой систем. Решение для одномассовой системы ищется в виде двух составляющих: перемещения линейной системы от действия внешней нагрузки и перемещения от, так называемой, фиктивной нагрузки, которая зависит от вида нелинейности. Нелинейная составляющая определяется из интегрального уравнения, учитывающего время первого включения дополнительной связи в процессе колебательного процесса. Для двухмассовой системы решение выражается с использованием импульсной переходной функции (ИПФ).

Рассмотрено поведение систем с демпфером вязкого трения, в качестве динамического воздействия на такие системы рассматривается гармоническое воздействие и импульсная нагрузка. Для одномассовой системы решение ищется с использованием интеграла Дюамеля, а в случае двухмассовой системы применяются импульсные переходные функции ИПФ.

В заключении третьей главы рассматриваются колебания нелинейной системы с тремя степенями свободы при кинематическом возбуждении.

**Глава четвертая** посвящена решению конкретных динамических задач для систем виброзащиты с дополнительными элементами. В главе рассмотрено поведение грохота ГИСТ 72 и используются приведенные в предыдущих главах зависимости сразу при 4-х вариантах виброизоляции. Вариант 1 - как система с одной степенью свободы, вариант 2- как система с одной степенью свободы, но с ограничителем перемещений, вариант 3-как система с двумя степенями свободы, а вариант 4-как система с двумя степенями свободы и ограничителем перемещений нижней массы. Исследуется поведение системы в переходных режимах пуска и остановки, в качестве результатов приводятся значения перемещений, а также усилий, передающихся на опорные конструкции при всех вариантах виброизоляции. Для различных величин жесткостей и масс в двухмассовой системе, приводятся данные по влиянию длительности переходных процессов пуска и остановки на уровни колебаний

Далее в главе рассматривается расчет фундаментов машин ударного действия на примере расчета молота М4138, так же как и при расчете грохота рассматриваются 4 типа виброизоляции. Решения построены и использованием ИПФ в форме интегралов Дюамеля. Показано, что введение дополнительных масс позволяет снижать уровни амплитудных перемещений и ускорений и сократить время затухания колебаний.

В заключении четвертой главы исследовано колебание массивного виброизолированного тела при произвольном смещении основания и выполнен расчет системы виброизоляции с демпфером вязкого трения на примере системы с одной степенью свободы.

**Глава пятая** включает в себя описание различных приближенных методов решения. Рассматривается метод гармонического баланса, при использовании которого производят замену нелинейных членов дифференциальных уравнений, описывающих движение системы, линейными членами, так чтобы можно было использовать линейные дифференциальные уравнения для решения нелинейных систем. Далее рассматривается метод гармонической линеаризации, заключающийся в замене нелинейной функции зависящей от малого параметра, линейной функцией.

Одним из перспективных методов, используемых при расчете нелинейных систем является метод, предложенный Ю.Т. Черновым, основанный на специальном выборе порождающих функций. Выбор порождающих функций осуществляется из условия минимума погрешности нулевого приближения по отношению к первому и последующим приближениям. На основе метода порождающих функций в работе решены две задачи с нелинейными гасителями колебаний.

**Актуальность работы** обусловлена важностью разработки новых и совершенствованию существующих методов расчета систем виброизоляции. Внедрению методов расчета виброизолированных систем, основанных на применении передаточных функций (ПФ) и импульсных переходных функций (ИПФ) способствует весьма частое применение нелинейных систем виброизоляции зданий и сооружений.

**Научная новизна работы** и, одновременно, её большая **практическая значимость** состоят в исследовании поведения ряда виброзащитных систем. Полученные автором работы результаты позволяют оценить эффективность виброзащитных систем с нелинейными характеристикам.

Публикации в полной мере отражают содержание работы. В процессе выполнения работы автор детально освоил различные методы анализа систем

с конечным числом степеней свободы при заданных динамических воздействиях, что и продемонстрировано на примерах расчета конкретных модельных задач.

**Достоверность работы** определяется корректностью постановки задач, строгостью применяемых методов строительной механики, динамики сооружений, теории колебаний и теории виброзащитных систем. Полученные в работе результаты сравнивались с аналитическими решениями, полученными другими авторами по ряду исследованных в работе вопросов. Результаты, приведенные в работе, получены с помощью апробированного современного программного комплекса для численных вычислений Mathlab.

### **Замечания по работе**

1. В работе представлены результаты расчета преимущественно модельных задач для одномассовой системы, двухмассовой и трехмассовой систем. Далеко не все встречающиеся на практике строительные объекты могут быть описаны с использованием систем со столь ограниченным числом масс. Было бы интересно включить в работу и рассмотрение задач, наиболее приближенных к расчету многоэтажных зданий.

2. Приведенная в Приложении 1 программа на языке Mathlab обладает весьма слабой структурированностью. Фактически представляет собой последовательную запись инструкций без явного оформления отдельных подпрограмм со своими входными параметрами. Это не позволяет, в частности, легко адаптировать приведенный текст программы для решения задач с большим числом масс. Для более наглядного восприятия алгоритма работы программного модуля весьма желательно было бы включение в текст работы блок-схемы разработанного модуля.

3. В работе рассматривается поведение, преимущественно, нелинейных динамических систем, однако на стр. 17 в качестве одного из преимуществ используемых автором работы методов указано, что используемый метод, позволяет избежать "построения самих собственных форм". Хотелось бы узнать, что имеет в виду автор под термином "собственные формы" применительно к нелинейным системам.

4. На стр. 26 содержится фраза, о том, что "виброизолятор переменной жесткости приводит к увеличению жесткости конструкции более, чем в 16 раз, а коэффициента демпфирования от 10% до 27%". Но ничего не говорится о том в какой момент достигается данное увеличение жесткости и плохо это или хорошо для рассматриваемых систем.

5. В пятой главе производится решение двух модельных динамических задач с использованием численно-аналитического метода порождающих

уравнений, предложенного Ю.Т. Черновым, однако в этой же главе указывается, что решение может быть получено также и с применением численных методов. Было бы желательно сравнить полученные автором результаты с решениями, полученными другими методами, в частности, методом конечных разностей или методом конечного элемента.

6. Группа редакционных замечаний:

- на стр. 22 фраза: «В зависимости от уровней вибрации контроллер (VSD) оптимально выбирает оптимальную жесткость» включает в себя элемент тавтологии;

- на стр. 22 фраза: "Это изменяет собственную частоту конструкции, тем самым устраняя резонанс конструкции [75]" содержит пропуск запятой после словосочетания "тем самым";

- на стр. 23 вместо слова "стоимость" содержится слово "стоймость";

- в тексте работы большая часть упоминаний интеграла Дюамеля помещена в кавычки, насколько это является обоснованным при столь широкой распространенности данного термина?

- на стр. 57 присутствуют ссылки на рис. 3.6а и 3.6б, однако данный рисунок содержит лишь одну часть, по всей видимости, автор ссылается на рис. 3.5а,б.

- приведенный на стр.83 в формуле 5.3 малый параметр в расшифровке к формуле и в самой формуле отличаются;

-на стр. 86 во фразе "После преобразований и с учетом (13.20) получим следующее уравнение" указан неверный номер формулы.

Отмеченные замечания не снижают положительного впечатления о представленной диссертационной работе.

### **Общее заключение по работе**

Диссертационная работа Зебилиллы Мохаммеда Диин-Халиса является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение важных научно-технических задач по численно-аналитическому исследованию поведения ряда систем виброзащиты, имеющих значение для развития строительной механики.

По актуальности, научной новизне и практической значимости, а также по структуре, содержанию и оформлению диссертация и автореферат отвечают требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842.

В работе выполнены все поставленные задачи и получены важные практически значимые результаты. Выводы и рекомендации представляются

достоверными и научно обоснованными. Текст автореферата соответствует содержанию диссертации. Основные положения диссертации опубликованы в 8 печатных работах, в том числе в 4-х статьях в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, в 2-х статьях, проиндексированных в международной базе Scopus.

Автор диссертации, Зебилила Мохаммед Диин-Халис, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.23.17 – «Строительная механика».

Официальный оппонент,  
кандидат технических наук,  
начальник отдела инструментальных  
обследований и проектирования  
виброзащиты  
общества с ограниченной ответственностью  
«ВИБРОСЕЙСМОЗАЩИТА»  
109341, г. Москва,  
Братиславская ул., 6, оф. 294  
Тел. 8 (499) 784-78-91, 784-78-92  
E-mail: vibroprotect@mail.ru  
<http://www.vibroprotect.ru>

Сизов  
Дмитрий Константинович

«07» ноября 2018 г.

Подпись к.т.н. Сизова Д.К. заверяю  
Генеральный директор ООО «ВИБРОСЕЙСМОЗАЩИТА», к.т.н.

«07» ноября 2018г.



/Моторин В.В./