

В.Л. МОНДРУС¹, Д.К. СИЗОВ¹, И.В. АКИМОВА²¹НИУ МГСУ «Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия²ООО «ВИБРОСЕЙСМОЗАЩИТА», г. Москва, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ ПЕРФОРИРОВАННОГО РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ВИБРОИЗОЛЯТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ, РЕАЛИЗУЮЩИХ МЕТОД КОНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

Аннотация. Описываются особенности статического и динамического поведения резинометаллических виброизоляторов, планируемых к использованию для виброизоляции зданий в современном строительном комплексе. Приводятся результаты конечно-элементного моделирования виброизоляторов с целью определения статических и динамических характеристик. Рассмотрены как однослойные виброизоляторы, так и виброизоляторы, включающие в себя три резиновых слоя. Как показали результаты расчетов, наличие перфораций существенным образом сказывается на несущей способности виброизоляторов, значительно уменьшая её, однако, эффективность работы таких виброизоляторов также повышается по сравнению с полностью монолитными виброизоляторами без отверстий. Это объясняется целым рядом причин, одна из которых – это практическая несжимаемость резиновых слоев. Фактически, резиновые тела могут подвергаться сжатию только за счет деформирования боковой поверхности, таким образом, развивая боковую поверхность резиновых слоев можно добиться приемлемой жесткости виброизолятора как конструктивного элемента, что позволит снизить жесткость системы виброизоляции. Существенно важным является и пространственное расположение отверстий, так размещение отверстий вблизи от боковой поверхности резинового слоя дает существенно меньший эффект, по сравнению с размещением отверстий в центре. В процессе расчета выяснилось, что в сжатых резиновых слоях наблюдается эффект образования ярко выраженных зон всестороннего сжатия. Наличие центральных отверстий приводит к разрушению таких зон в большинстве образцов, что позволяет в большей степени понизить первую собственную частоту виброизолируемой системы, тем самым, способствуя повышению эффективности виброзащитных мероприятий. Выбор конфигурации отверстий представляет собой оптимизационную задачу, где, с одной стороны, необходимо обеспечить приемлемую с точки зрения практики виброизоляции несущую способность виброизоляторов при заданных размерах виброизолятора в плане, а, с другой стороны, максимально снизить жесткость системы, увеличивая, таким образом, эффективность виброзащитных мероприятий.

Ключевые слова: резинометаллические виброизоляторы, виброзащита, метод конечного элемента, многослойные виброизоляторы, техногенная вибрация

V.L. MONDRUS¹, D.K. SIZOV¹, I.V. AKIMOVA²¹NRU MG SU «Moscow State Construction University», Moscow, Russia²LLC «VIBROSEISMOZASCHITA», Moscow, Russia

DETERMINATION OF THE CHARACTERISTIC FEATURES OF THE OPERATION OF A PERFORATED RUBBER-METALLIC VIBRATOR INSULATOR WITH THE USE OF SOFTWARE PACKAGES IMPLEMENTING THE FINITE ELEMENT METHOD

Abstract. The features of the static and dynamic behavior of rubber-metal vibration isolators planned for use for vibration isolation of buildings in a modern building complex are considered.

© Мондрус В.Л., Сизов Д.К., Акимова И.В., 2023

The results of finite element modeling of vibration isolators are presented in order to determine the static and dynamic characteristics. Both single-layer vibration isolators and vibration isolators, including three rubber layers, are considered. As the calculation results showed, the presence of perforations significantly affects the bearing capacity of vibration isolators, significantly reducing it, however, the efficiency of such vibration isolators also increases compared to completely monolithic vibration isolators without holes. This is due to a number of reasons, one of which is the practical incompressibility of the rubber layers. In fact, rubber bodies can be subjected to compression only due to the deformation of the side surface, thus, by developing the side surface of the rubber layers, it is possible to achieve acceptable rigidity of the vibration isolator as a structural element, which will reduce the rigidity of the vibration isolation system. The spatial arrangement of the holes is also essential, since the placement of the holes close to the side surface of the rubber layer gives a significantly smaller effect compared to the placement of the holes in the center. In the process of calculation, it turned out that in the compressed rubber layers, the effect of the formation of pronounced zones of all-round compression is observed. The presence of central holes leads to the destruction of such zones in most samples, which makes it possible to reduce the first natural frequency of the vibration-isolated system to a greater extent, thereby contributing to an increase in the effectiveness of vibration protection measures. The choice of the hole configuration is an optimization problem, where, on the one hand, it is necessary to ensure the bearing capacity of vibration isolators acceptable from the point of view of vibration isolation for given dimensions of the vibration isolator in the plan, and, on the other hand, to minimize the rigidity of the system, thus increasing the effectiveness of vibration protection measures.

Keywords: rubber-metal vibration isolators, vibration protection, finite element method, multilayer vibration isolators, industrial vibration.

Введение

В современном строительном комплексе используются различные методы борьбы с вибрацией техногенного происхождения, возникающей от движения поездов метрополитена, трамваев, линий железных дорог. В большинстве случаев данные вибрации абсолютно безопасны с точки зрения оказываемого влияния на сами несущие конструкции, но вызывают значительные изменения в здоровье людей при их длительном воздействии [1-13]. Люди, подверженные повторяющемуся вибрационному воздействию, испытывают значительные стрессы, чаще болеют и утомляются, происходит постепенное снижение работоспособности и, в целом, снижается качество жизни. Безусловно, полностью исключить негативное воздействие вибрации, распространяющейся по грунтовому массиву от источника воздействия и, далее, по конструкциям здания непосредственно на ограждающие и несущие конструкции эксплуатируемых жилых и общественных помещений здания практически невозможно, но негативное влияние желательно и возможно ограничить. В настоящее время основным нормативным документом, регламентирующим на территории Российской Федерации максимально допустимые уровни вибрации в помещениях жилых, общественных зданий и на производстве является СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Именно для удовлетворения требований данного нормативного документа и применяются, в основном, системы виброзащиты зданий. Известны различные способы гашения вибрационных воздействий, большинство из которых заключается в опирании основных несущих конструкций здания на различного рода упругие системы. В качестве упругих элементов чаще всего применяются резинометаллические виброизоляторы, пенополиуретановые маты, а также системы, основанные на пружинных сборках [14].

В практике отечественной виброзащиты наибольшее применение нашли системы, основанные на использовании резинометаллических виброизоляторов, устанавливаемые в конструкции зданий по методике д.т.н. М.А. Дашевского. Подробное изложение основ методики виброизоляции, осуществляемой по технологии "отсроченного монтажа", можно найти в книге [14]. Суть технологии отсроченного монтажа заключается в установке виброизоляторов в пределах специально устраиваемого "пояса виброзащиты", размещаемого в процессе проектирования и строительства здания чаще всего в уровне подвального этажа.

Пояс виброзащиты устраивается с использованием конструкций из монолитного железобетона и включает в себя специально оборудованные ниши для установки виброизоляторов. Уникальной особенностью метода М.А. Дашевского является установка виброизоляторов в уже возведенном до проектной отметки железобетонном каркасе здания до начала периода отделочных работ. В пределах пояса виброзащиты резинометаллические виброизоляторы сжимаются с использованием гидравлических домкратов, что позволяет точно повторить "эпюру действующих давлений" от веса здания, и, таким образом, избежать любых ошибок и неточностей, которые неизбежны при выполнении расчета здания. Технология "отсроченного монтажа" также позволяет осуществить замену вышедших из строя резинометаллических виброизоляторов с использованием их повторного монтажа.

Внешний вид установленного в проектное положение виброизолятора приводится на рисунке 1.

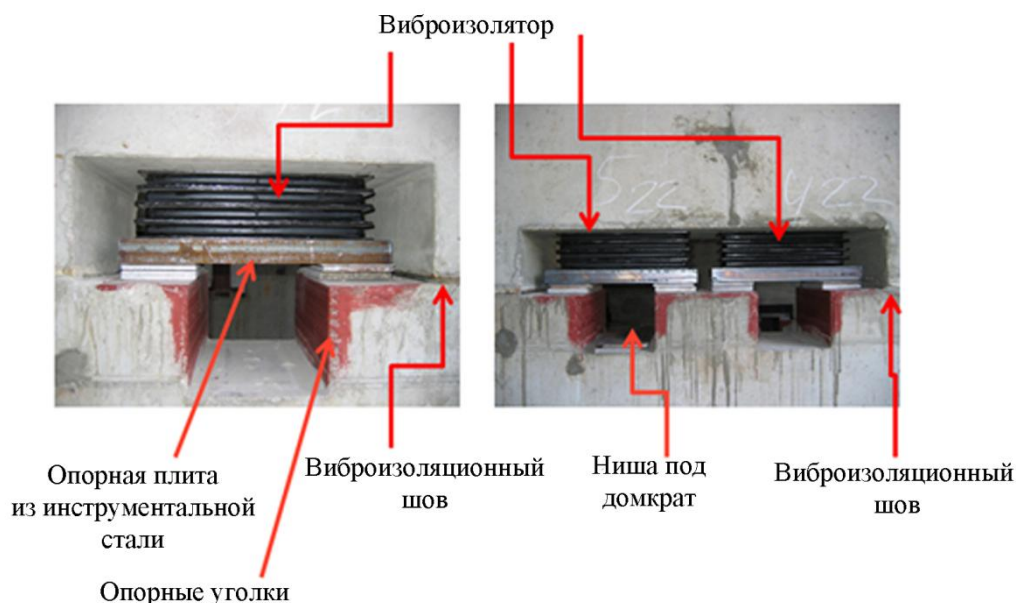


Рисунок 1 – Внешний вид установленного в проектное положение четырехслойного резинометаллического виброизолятора на одном из объектов в г. Москва

Несколько позднее на территории России началось применение систем виброизоляции строительных объектов с использованием полиуретановых матов. Данная технология менее требовательна к принимаемым проектным решениям, в меньшей степени затрагивает несущие конструкции здания, чем использование резинометаллических виброизоляторов, но требует установки полиуретановых матов уже в процессе строительства, то есть любые неточности в определении вертикальной нагрузки на конструкции здания в этом случае отразятся на равномерности осадки здания, расположенного на виброизолирующем слое; замена виброизолирующего подстилающего слоя также невозможна [14]. Аналогично, по незаменяемой схеме под зданиями устанавливаются и системы сейсмоизоляции, основанные на применении многослойных резино-металлических сейсмоизоляторов [15].

Несколько менее распространен в строительном комплексе России метод, основанный на применении сборок из стальных упругих пружин. Данный метод, обладая неоспоримым преимуществом – максимальной эффективностью виброизоляции, особенно в низком диапазоне частот воздействия, однако, является наиболее громоздким по принимаемым конструктивным решениям.

Далее в статье будет рассматриваться резинометаллический виброизолятор, как основной элемент виброзащиты объектов по технологии "отсроченного монтажа". До настоящего момента конструкции данных устройств не предполагала наличия перфораций,

размещаемых внутри виброизолирующего упругого резинового слоя, это объяснялось желанием сделать такое устройство наиболее компактным и позволяло при использовании многослойных виброизоляторов достичь практически любой требуемой эффективности виброзащиты. С целью повышения эффективности виброизоляционных работ и снижения их стоимости было предложено использовать виброизолирующие элементы с большей площадью боковой поверхности. Данный эффект достигается за счет внедрения в резиновые слои виброизоляторов необходимого числа отверстий. Рассматривается линейка однослойных резинометаллических виброизоляторов с размерами резинового слоя 450x350x40 мм, 450x300x40 мм, 450x350x30 мм, 450x250x30 мм, 450x150x30 мм, 450x480x40 мм и 450x480x30 мм, без отверстий, с одним отверстием диаметром 50 мм, а также с тремя-пятью отверстиями, из которых центральное отверстие обладает тем же диаметром, а отверстия, размещенные ближе к краям виброизолятора обладают меньшим диаметром 30 мм. Помимо однослойных образцов исследуются три трехслойных виброизолятора с тремя резиновыми пластинами размерами 450x480x30 мм с аналогичным размещением отверстий (один из трехслойных виброизоляторов также без отверстий). Все трехслойные виброизоляторы армированы стальными листами толщиной 4 мм, выходящими за пределы резиновых слоев на 20-30 мм. Стальные армирующие пластины в резинометаллических виброизоляторах жестко привулканизованы к резиновым слоям, что позволяет значительно повысить грузоподъемность и избежать явления неограниченного горизонтального смещения резиновых слоев при их статическом сжатии [16].

Вопросам распространения волн и оценке влияния вибрационного воздействия от движущихся составов метрополитена посвящена обширная литература [1-13], в большинстве случаев рассматриваются эмпирические зависимости, позволяющие учитывать затухание волнового процесса при распространении вибрации в грунте и последующее распространение колебаний по конструкциям здания. Наиболее полно вопрос прогноза уровней вибрации от воздействия движения поездов метрополитена представлен в СП 465.1325800.2019 "Здания и сооружения. Защита от вибрации метрополитена" и в СП 441.1325800.2019 "Защита зданий от вибрации, создаваемой железнодорожным транспортом", в том числе с учетом зарубежного опыта виброзащиты.

Однако в существующей литературе до текущего момента практически не рассматривалась проблема учета влияния перфорации резинового слоя резинометаллических виброизоляторов на ожидаемую эффективность виброзащиты и изменение грузоподъемности.

Модели и методы

В процессе исследования используется современный программный комплекс, реализующий метод конечного элемента. Все части резинометаллического виброизолятора (резиновые слои и стальные армирующие пластины) моделируются с использованием пространственных Solid конечных элементов. Исходя из известных рекомендаций по толщине каждого резинового слоя должно быть не менее 2-х-3-х слоев конечных элементов. При выполнении расчетов для резиновых пластин толщиной 30 мм принято три слоя пространственных конечных элементов, в то время как для пластин толщиной 40 мм принято четыре слоя конечных элементов. Для моделирования стальных пластин принято два слоя конечных элементов. В рамках допущения рассматриваемой задачи материал резиновых и армирующих слоев принят как линейно упругий. Резиновые слои приняты со следующими характеристиками: модуль упругости 5,0 МПа, коэффициент Пуассона 0,49.

При выполнении статического расчета осадка однослойных и трехслойных виброизоляторов принимается как 0,17 от первоначальной высоты резиновых слоев. Закрепления верхних и нижних узлов конечных элементов - жесткое, что в наибольшей степени соответствует условию совместной вулканизации резины и стальных пластин. Верхняя опорная плоскость виброизолятора перемещается на величину сжатия (в МКЭ модели задано вертикальное перемещение верхних узлов). Внешний вид характерных МКЭ моделей резинового слоя показан на рисунке 2.

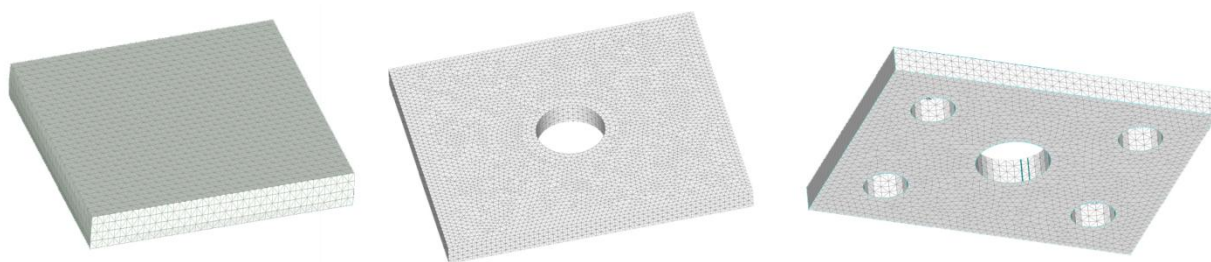


Рисунок 2 – Характерные конечно-элементные модели рассматриваемой линейки виброизоляторов (показаны модели, соответствующие резиновому слою 450x350x40 мм)

Аналогично рассмотрены три модели трехслойного резинометаллического виброизолятора с одной и пятью перфорациями. Внешний вид МКЭ моделей трехслойного виброизолятора показан на рисунке 3. Стальные армирующие слои не имеют перфораций в местах расположения отверстий в резиновых слоях. Следует отметить, что ряд работ [16], [17], [18] содержат описание результатов расчета однослойных резинометаллических виброизоляторов, выполненных методом конечного элемента, однако перфорированные и многослойные виброизоляторы ранее не рассматривались. В работе [19] приводится методика и результаты инженерного расчета резинометаллического виброизолятора по авторской методике М.А. Дашевского, в которой также рассматривается преимущественно однослойный виброизолятор.

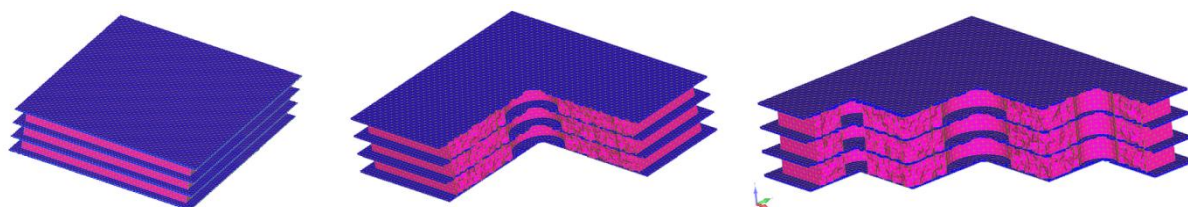


Рисунок 3 – Конечно-элементные модели трехслойных виброизоляторов (двух перфорированных и полнотелого)

Помимо статического расчета резинометаллических виброизоляторов было осуществлено определение собственных частот. Основное внимание уделялось вертикальной форме собственных колебаний, наиболее важной с точки зрения обеспечения виброзащитных свойств. С этой целью рассматривалась расчетная схема, представленная на следующем рисунке 4.

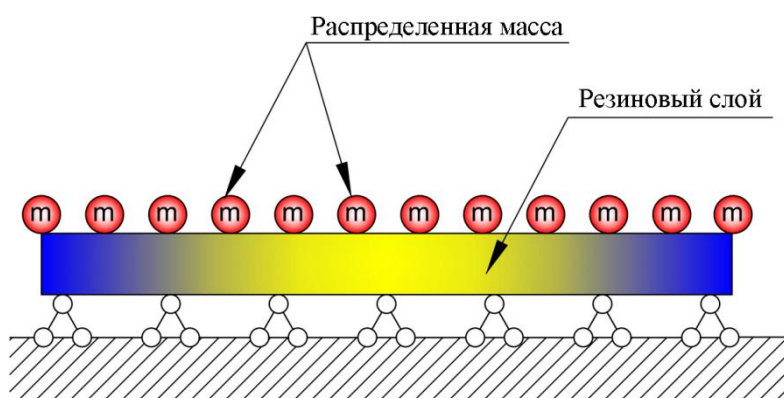


Рисунок 4 – Расчетная схема для определения собственных частот нагруженных резинометаллических виброизоляторов

Нижняя грань МКЭ модели виброизолятора при выполнении модального анализа была полностью закреплена от перемещений по трем направлениям, в то время как для верхней грани была оставлена одна степень свободы – возможность вертикального

перемещения. Для моделирования распределения массы по поверхности верхней грани возможны два способа. Первый способ заключается в создании на верхней грани виброизолятора пластинчатых конечных элементов, обладающих повышенной жесткостью (жесткость на несколько порядков больше жесткости резинового слоя на сжатие). Плотность данных конечных элементов должна быть подобрана таким образом, чтобы с учетом задаваемой толщины фиктивной пластинки смоделировать массу, приложенную к верхней грани (учитывает вес здания, действующий на виброизолятор). Второй способ задания распределенной по поверхности верхней грани виброизолятора массы заключается в использовании так называемых Rigid элементов, которые связывают степени свободы конечных элементов с одним произвольным узлом, к которому и прикладывается сосредоточенная масса. Согласно большинства рекомендаций [20], [21], [22] к конечно элементным программным комплексам наиболее предпочтительным является второй способ, так как позволяет избежать существования в рамках одной модели конечных элементов с сильно различающимися жесткостями, что может привести к численной неустойчивости. В статье приводятся данные, полученные с использованием Rigid элементов.

Результаты исследования и их анализ

После выполнения статического расчета линейки однослойных резинометаллических виброизоляторов без перфораций были получены грузоподъемности виброизоляторов, а последующий модальный анализ позволил получить значения первых собственных частот. Данные результатов расчетов приводятся в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета для виброизоляторов без перфораций

№ п.п.	Размеры	Величина вертикальной реакции, тс.	Первая собственная частота, Гц
1	450х350х40 мм	108,01 тс	11,71 Гц
2	450х300х40 мм	84,19 тс	12,85 Гц
3	450х350х30 мм	114,04 тс	12,92 Гц
4	450х250х30 мм	67,10 тс	14,24 Гц
5	450х150х30 мм	26,32 тс	15,96 Гц
6	450х480х40 мм	122,67 тс	13,21 Гц
7	450х480х30 мм	128,45 тс	13,11 Гц

Обращает на себя внимание тот факт, что для большинства образцов внутри резинового слоя наблюдается наличие зоны, в которой материал находится в состоянии близком к всестороннему сжатию. Исключением из этого правила стал образец № 5 (размеры 450х150х30 мм), обладающий вытянутой формой и большим соотношением площади свободной боковой поверхности к площади опорных плоскостей. Данную ситуацию иллюстрирует приведенные на следующем рисунке 5 изополя напряжения сжатия, действующего на горизонтальных площадках верхней грани однослойного виброизолятора.

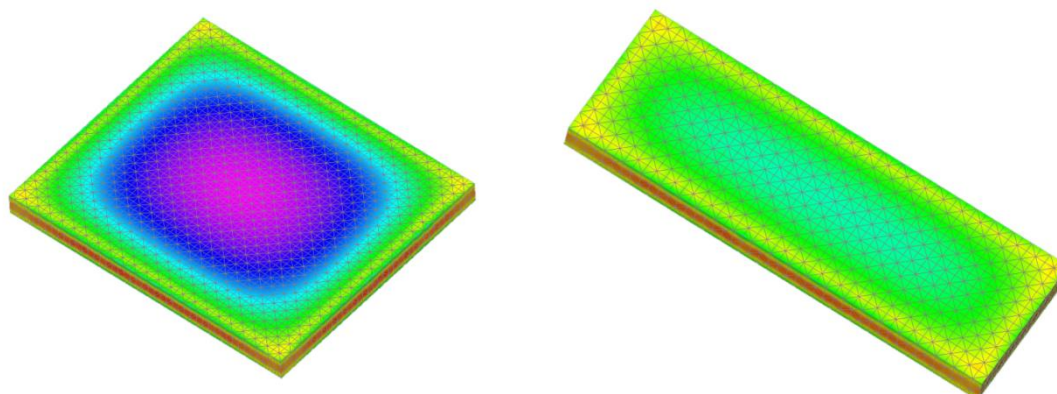


Рисунок 5 – Расположение зоны всестороннего сжатия внутри резинометаллических виброизоляторов с различными габаритами в плане

Найденные собственные частоты позволяют определить теоретическую эффективность виброзащиты по простейшей формуле [14], описывающей поведение одномассового осциллятора. Графики ожидаемой эффективности виброизоляции для виброизоляторов без перфораций приводятся на рисунке 6.

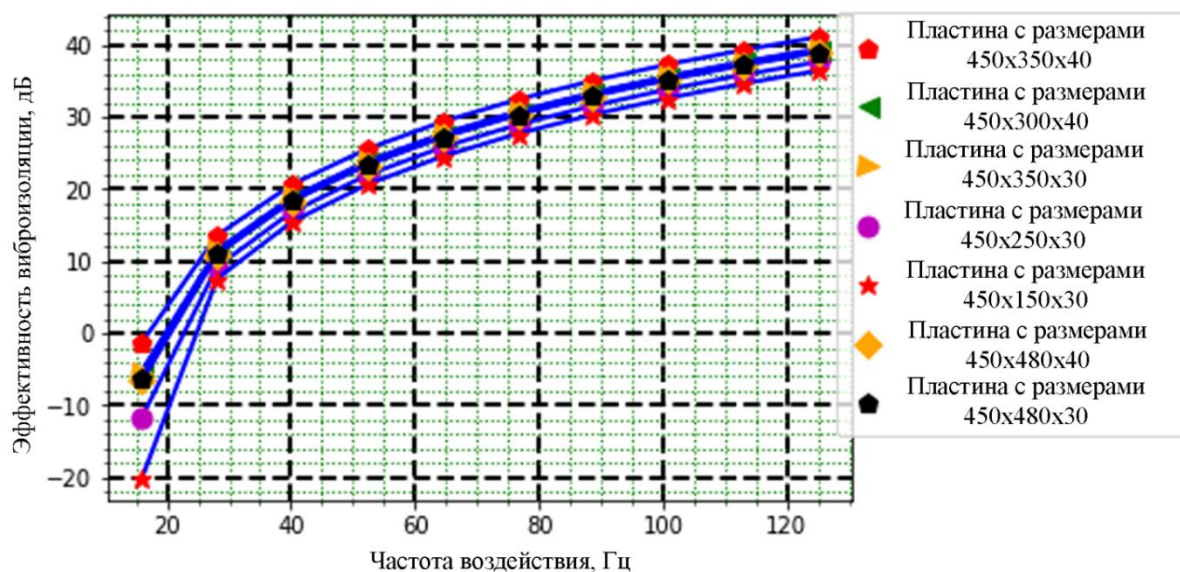


Рисунок 6 – Ожидаемая эффективность виброизоляции для полнотелых виброизоляторов для различных частот внешнего воздействия

Аналогично для заданной линейки однослойных виброизоляторов с перфорациями (одной по центру) и тремя-пяти были выполнены статические расчеты и определение первых собственных частот. Результаты расчетов приводятся в таблицах 2 и 3 соответственно.

Наличие перфораций значительно изменило картину распределения напряжений внутри виброизолятора, зона всестороннего сжатия уменьшилась и стала значительно менее выраженной (рисунки 7 и 8).

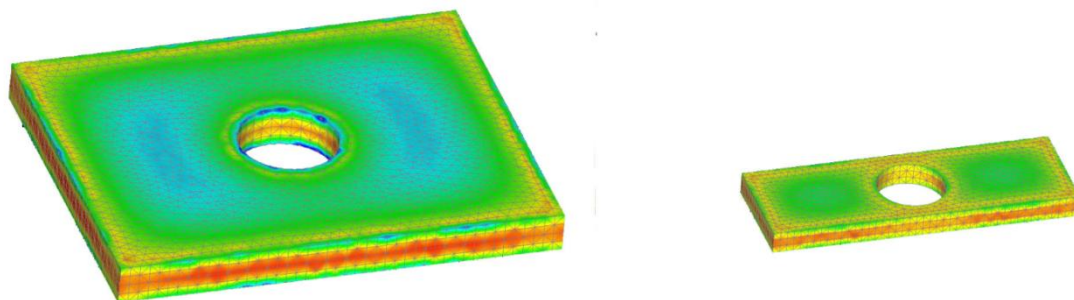


Рисунок 7 – Расположение зоны всестороннего сжатия для виброизоляторов с одним отверстием

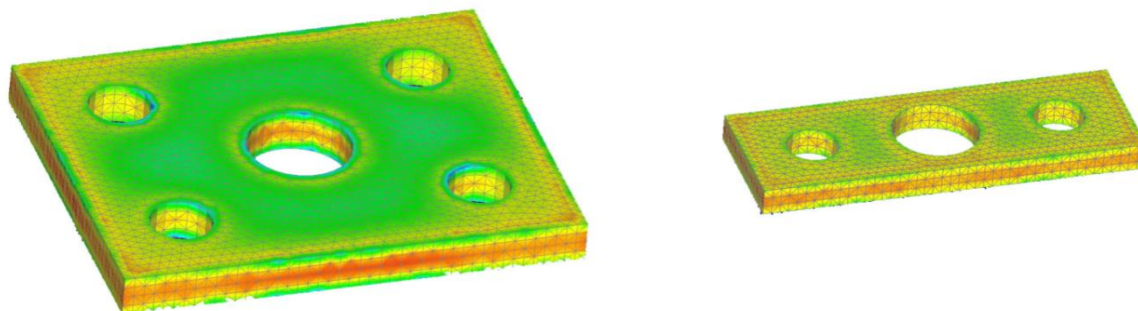


Рисунок 8 – Расположение зоны всестороннего сжатия для виброизоляторов с несколькими отверстиями

Таблица 2 – Результаты расчета для виброизоляторов с одной перфорацией

№ п.п.	Размеры	Величина вертикальной реакции, тс.	Первая собственная частота, Гц
1	450x350x40 мм	70,55 тс	8,31 Гц
2	450x300x40 мм	53,89 тс	6,16 Гц
3	450x350x30 мм	77,39 тс	7,41 Гц
4	450x250x30 мм	43,25 тс	7,35 Гц
5	450x150x30 мм	17,48 тс	7,31 Гц
6	450x480x40 мм	81,52 тс	6,12 Гц
7	450x480x30 мм	88,92 тс	7,37 Гц

Таблица 3 – Результаты расчета для виброизоляторов с тремя-пятью перфорациями

№ п.п.	Размеры	Величина вертикальной реакции, тс.	Первая собственная частота, Гц
1	450x350x40 мм	46,42 тс	6,16 Гц (пять отверстий)
2	450x300x40 мм	32,92 тс	6,16 Гц (пять отверстий)
3	450x350x30 мм	49,63 тс	7,31 Гц (пять отверстий)
4	450x250x30 мм	23,25 тс	7,28 Гц (пять отверстий)
5	450x150x30 мм	10,71 тс	7,28 Гц (три отверстия)
6	450x480x40 мм	55,70 тс	6,10 Гц (пять отверстий)
7	450x480x30 мм	59,73 тс	7,34 Гц (пять отверстий)

На следующих графиках показана зависимость несущей способности виброизолятора от величины свободной боковой поверхности резинового слоя, меняющейся за счет размещения отверстий. Как показано в работах [14], [19] важным параметром резинометаллического виброизолятора является так называемый "коэффициент формы", отражающий отношение свободной от закреплений и нагрузок боковой поверхности резинового слоя к общей площади боковой поверхности, в частности, данный параметр оказывает первостепенное влияние на величину грузоподъемности резинометаллического виброизолятора, так как резина является практически несжимаемым материалом (коэффициент Пуассона $\sim 0,49$). Следующие графики на рисунке 9 иллюстрируют данную зависимость для различных пластин.

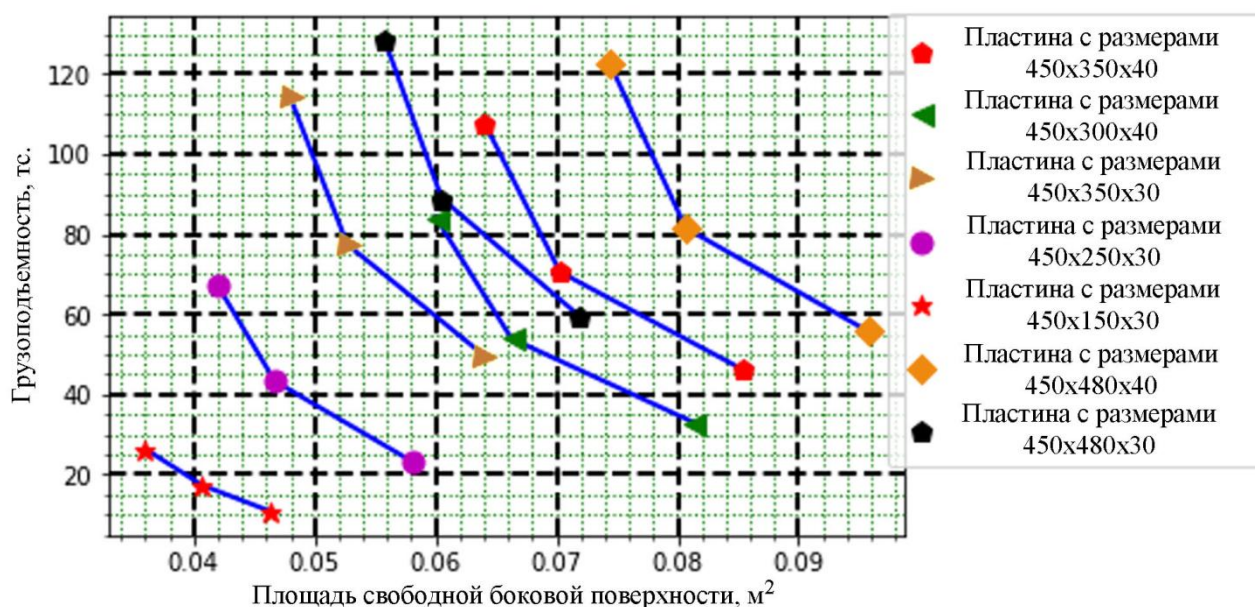


Рисунок 9 –Графики зависимости несущей способности виброизолятора от площади свободной поверхности

Также как и для виброизоляторов без отверстий, для перфорированных виброизоляторов возможно построить графики теоретической эффективности виброзащиты, рассматривая простейшую модель одномассового осциллятора (см. рисунок 10 и рисунок 11). Характерно, что при увеличении площади боковой поверхности перфораций в резиновых слоях эффективность виброизоляции системы в меньшей степени зависит от конкретной геометрии контура резинового слоя, в большей степени эффективность виброзащиты зависит именно от суммарной площади боковой поверхности резинового слоя, этим и объясняется качественное отличие графиков на рисунке 10 и рисунке 11 (большой разброс ожидаемой теоретической эффективности системы виброизоляции, основанной на применении виброизоляторов с одним отверстием по сравнению с виброизоляторами со многими отверстиями).

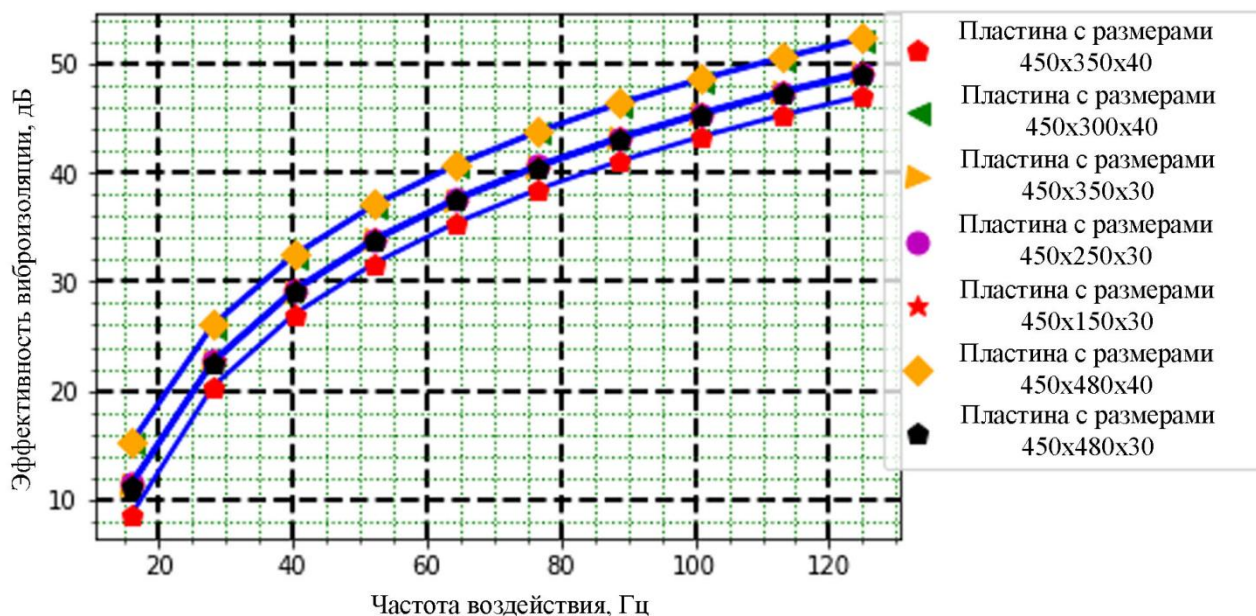


Рисунок 10 – Ожидаемая эффективность виброизоляции для виброизоляторов с одним центральным отверстием для различных частот внешнего воздействия

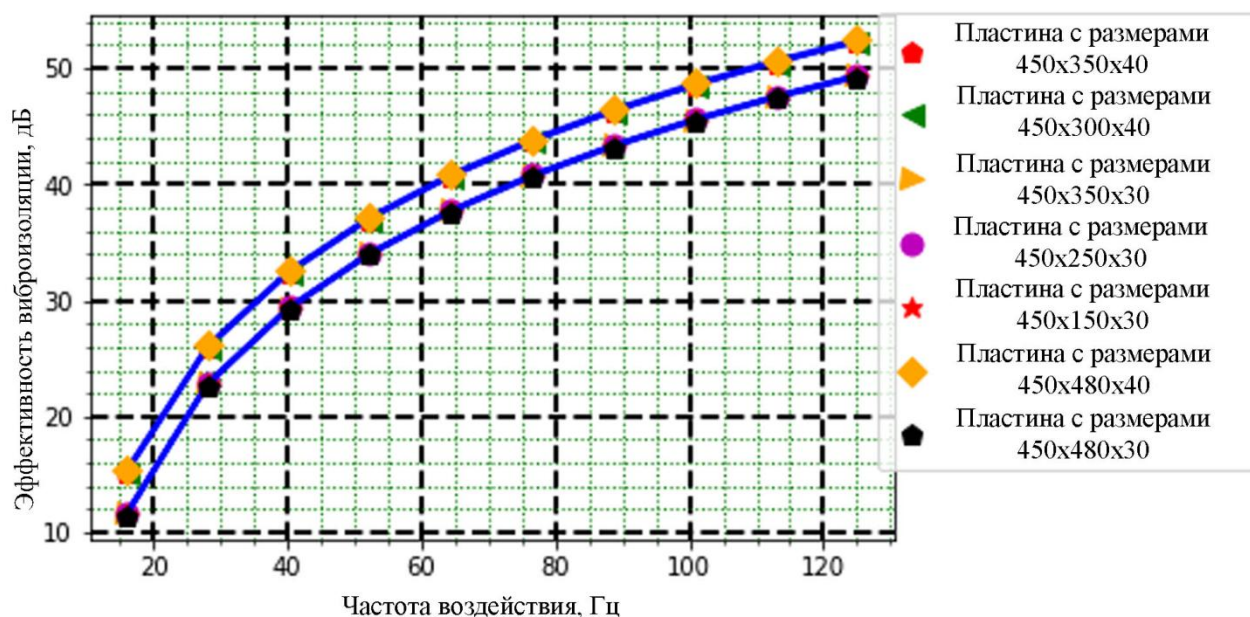


Рисунок 11 – Ожидаемая эффективность виброизоляции для виброизоляторов с несколькими (3 и 5) отверстиями для различных частот внешнего воздействия

Для трехслойного виброизолятора с отверстиями и без, также были получены значения несущей способности и значения собственных частот (рисунок 12). Данные этих расчетов приводятся в таблице 4. Использование программного комплекса, реализующего МКЭ в случае расчета трехслойного виброизолятора, особенно при наличии отверстий позволяет более полно описать напряженно-деформированное состояние и дополнить результаты, которые возможно получить с использованием методики, изложенной в [14] и [19].

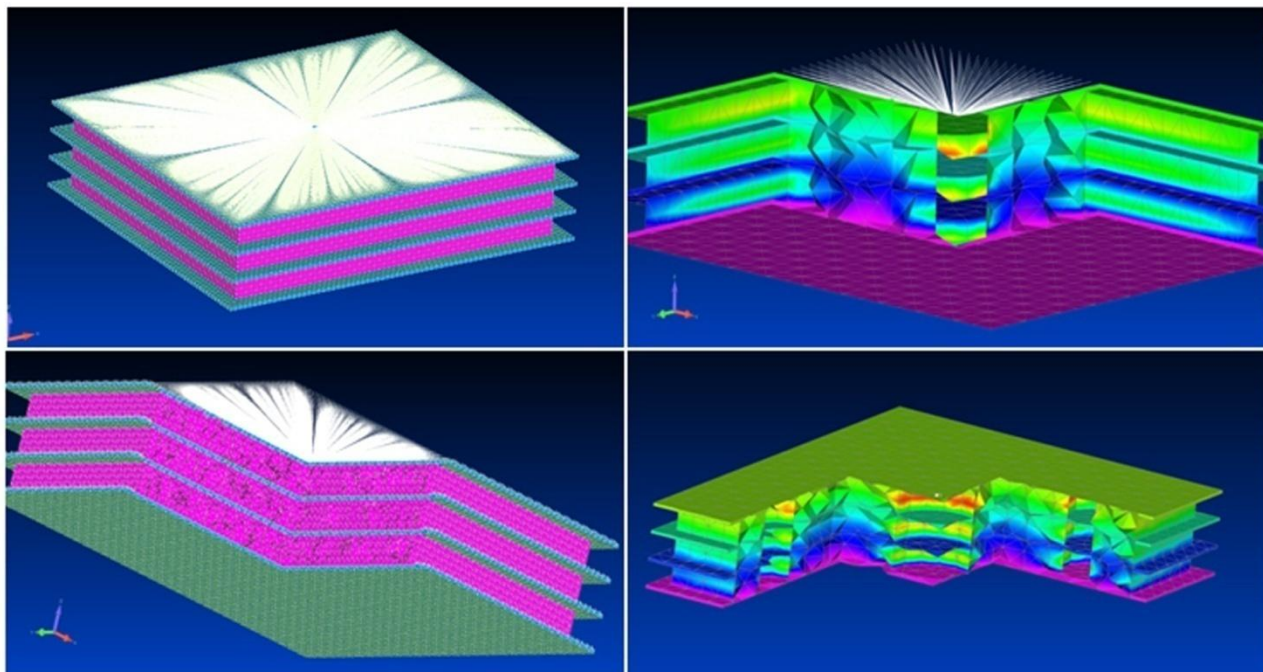


Рисунок 12 –Конечно-элементные модели трехслойного виброизолятора с Rigid элементами (независимый узел Rigid элемента соединен с элементом массы)

Таблица 4 – Результаты расчета многослойного виброизолятора

№ п.п.	Размеры	Величина вертикальной реакции, тс.	Первая собственная частота, Гц
1	Три пластины 450х480х30 мм без отверстий	4,44 Гц	128,45 тс
2	Три пластины 450х480х30 мм с одним отверстием по центру	4,37 Гц	88,92 тс
3	Три пластины 450х480х30 мм с одним отверстием по центру и 4-мя в углах	4,37 Гц	59,73 тс

Выводы

Для однослойного виброизолятора наличие одного отверстия, расположенного по центру зоны всестороннего сжатия приводит к значительному снижению грузоподъемности (в среднем на 30 %).

1. Наличие нескольких (3-5-ть) отверстий приводит к еще более значительному снижению грузоподъемности (в среднем на 50 %).

2. Для однослойного виброизолятора наличие одного отверстия повышает эффективность виброизоляции в октавной полосе 31,5 Гц в среднем на 10-11 дБ.

3. Наличие дополнительных отверстий, размещенных ближе к краю резинового слоя не приводит к большему увеличению эффективности. Наблюдается лишь значительное уменьшение несущей способности.

4. В многослойном виброизоляторе наличие, либо отсутствие отверстий сказывается в незначительной степени на эффективности работы системы виброизоляции, однако наличие отверстий, так же как и в однослойном варианте приводит к существенному сокращению несущей способности. Возможным путем преодоления данной ситуации является работа резиновых слоев в многослойных виброизоляторах при значительно больших относительных деформациях сжатия, а также использование однослойных виброизоляторов с перфорациями, но обладающими большей толщиной резинового слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дашевский М.А., Ковальчук О.А., Мондрус В.Л. Влияние поездного состава метрополитена на поведение крупнопанельных зданий повышенной этажности // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений (ССБС). 2004. № 3. С. 40-43.
2. Дашевский М.А., Моторин В.В., Акимова И.В. Формирование напряжённого состояния виброизолируемого здания в процессе монтажа резинометаллических виброизоляторов // Москва. Вестник МГСУ. 2015. № 12. С. 25-33.
3. Liu W.N., M.Ma, Metro Train Induced Environmental Vibrations: Prediction, Evaluation and Control // Science Press, Beijing, China. 2013. Pp. 615-626. doi:10.1007/978-981-15-2349-6_38
4. Fang L., Yao J., Xia H. Prediction on soil-ground vibration induced by high-speed moving train based on artificial neural network model // Advances in Mechanical Engineering. 2019. Vol. 11. No. 5. doi:10.1177/1687814019847290 journals.sagepub.com/home/ade
5. Tao Sheng, Gan-bin Liu, Xuecheng Bian, Wei-xing Shi, Yue Chen, Development of a three-directional vibration isolator for buildings subject to metro- and earthquake-induced vibrations // Engineering Structures. 2022. Vol. 252. 113576, ISSN 0141-0296
6. Yang, Jianjin, Shengyang Zhu, Wanming Zhai, Georges Kouroussis, Yue Wang, Kaiyun Wang, Kai Lan, Fangzheng Xu, Prediction and mitigation of train-induced vibrations of large-scale building constructed on subway tunnel // Science of The Total Environment. 2021. Vol. 668. Pp. 485-499.
7. Sheng X., Jones C.J.C., Thompson D.J. Prediction of ground vibration from trains using the wavenumber finite and boundary element methods // Journal of Sound and Vibration. 2006. Vol. 293. No. 3-5. Pp. 575-586.
8. Мондрус В.Л., Хуэн Л.Т.Т., Сизов Д.К. Распределение амплитуд виброускорений в многоэтажном административном здании от источников техногенного происхождения // Вестник МГСУ. 2010. № 1. С. 113-116.
9. Волков А.В., Калашникова Н.К., Курнавин С.А., Веретина И.А. Виброзащита зданий, расположенных вблизи линий метрополитена. [Электронный ресурс]. <http://www.mukhin.ru/stroysovet/funds/35.html> (дата обращения: 24.07.2023).
10. Дашевский М.А., Моторин В.В., Мамажанов М.А. Виброзащита крупнопанельных зданий // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2004. № 10. [Электронный ресурс]. <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-vibrozaschity-zdaniy-i-sooruzheniy-v-pole-stroitelnyh-normativov-rf/viewer> (дата обращения: 24.07.2023).
11. Trifunac M.D., Ivanovic S.S., Todorovska M.I. Wave propagation in a seven-story reinforced concrete building: III Damage detection via changes in wavenumbers // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2003. Vol. 23. Iss. 1. Pp. 65-75.
12. Mickaitis M., Stauskis V.J. Vibration transmission through joints of walls and columns in frame buildings // Journal of civil engineering and management. 2005. Vol. XI. No. 3. Pp. 185-191.
13. Алявдин П.В., Музычкин Ю.А. Вибрация конструкций каркасного здания, вызванная движением поездов метрополитена // Вестник Белорусского национального технического университета: научно-технический журнал. 2011. № 2. С. 5-9.
14. Дашевский М.А., Мондрус В.В., Моторин В.В., Сизов Д.К. Виброзащита зданий Москва: Из-во ООО «Сам Полиграфист», 2021. 252 с.
15. Мондрус В.Л., Сизов Д.К., Хуэн Л.Т.Т. Снижение уровня сейсмического воздействия при движении грунта основания с использованием сейсмоизоляторов // Строительные материалы, оборудование, технологии XIX века. 2011. № 1(144). С. 48-49.
16. Балакин П.Д., Красотина Л.В., Кривцов А.В. Моделирование работы резинометаллического виброизолятора // Омск: Омский научный вестник. 2016. № 3 (147). С. 5-9.
17. Федорова А.С. Расчет систем виброизоляции в том числе с нелинейными характеристиками // Дни студенческой науки Сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов института строительства и архитектуры НИУ МГСУ (13-17 марта 2017). 2017. С. 871-874. ISBN 978-5-7264-1604-5.

18. Zhixing Li, Jingjun Lou, Shijian Zhu and Simi Tang, Simulation on performance of rubber isolator based on ANSYS, 2011 // Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, Inner Mongolia, China, 2011. Pp. 1608-1611. doi:10.1109/MACE.2011.5987260
19. Дашевский М.А. Инженерный метод нелинейного расчета резинометаллических виброизоляторов для зданий // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2006. № 6. С. 37-41.
20. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/Nastran for Windows. Москва: ДМК Пресс, 2003. 448 с.
21. Басов К.А. ANSYS Справочник пользователя. Москва: ДМК Пресс, 2014. 640 с.
22. Басов К.А. ANSYS В примерах и задачах. Москва: КомпьютерПресс, 2002. 224 с.

REFERENCES

1. Dashevskyy M.A., Koval'chuk O.A., Mondrus V.L. Vliyaniye poyezdnogo sostava metropolitena na povedeniye krupnopanel'nykh zdaniy povyshennoy etazhnosti [The Influence of the Subway Train Composition on the Behavior of Large-Panel High-Rise Buildings] // Seysmostoykoye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy (SSBS). 2004. No. 3. Pp. 40-43. (rus).
2. Dashevskiy M.A., Motorin V.V., Akimova I.V. Formirovaniye napryazhonnogo sostoyaniya vibroizoliruyemogo zdaniya v protsesse montazha rezinometallicheskiykh vibroizolyatorov [Formation of a stressed state of a vibration-insulated building during the installation of rubber-metal vibration isolators] Vestnik MGSU. 2015. No. 12. Pp.25-33. (rus).
3. Liu W.N., M. Ma, Metro Train Induced Environmental Vibrations: Prediction, Evaluation and Control // Science Press, Beijing, China. 2013. Pp. 615-626. doi:10.1007/978-981-15-2349-6_38
4. Fang L., Yao J., Xia H. Prediction on soil-ground vibration induced by high-speed moving train based on artificial neural network model // Advances in Mechanical Engineering, 2019. Vol. 11. No. 5. doi:10.1177/1687814019847290 journals.sagepub.com/home/ade
5. Tao Sheng, Gan-bin Liu, XuechengBian, Wei-xing Shi, Yue Chen, Development of a three-directional vibration isolator for buildings subject to metro- and earthquake-induced vibrations // Engineering Structures. 2022. Vol. 252. 113576, ISSN 0141-0296
6. Yang, Jianjin , Shengyang Zhu, Wanming Zhai, Georges Kouroussis, Yue Wang, Kaiyun Wang, Kai Lan, Fangzheng Xu, Prediction and mitigation of train-induced vibrations of large-scale building constructed on subway tunnel // Science of The Total Environment. 2021. Vol. 668. Pp. 485-499.
7. Sheng X., Jones C.J.C., Thompson D.J. Prediction of ground vibration from trains using the wavenumber finite and boundary element methods // Journal of Sound and Vibration. 2006. Vol. 293. No. 3-5. Pp. 575-586.
8. Mondrus V.L., Khuen L.T.T., Sizov D.K. Raspredeleniye amplitud vibroshkolebaniy v mnogoetazhnom administrativnom zdanii ot istochnikov tekhnogennogo proiskhozhdeniya [Distribution of amplitudes of vibration accelerations in a multi-storey administrative building from sources of technogenic origin] Vestnik MGSU. 2010. No. 1. Pp. 113-116. (rus).
9. Volkov A.V., Kalashnikova N.K., Kurnavin S.A., Veretina I.A. Vibrozashchita zdaniy, raspolozhennykh vblizi liniy metropolitena [Vibration protection of buildings located near metro lines]. [Online]. <http://www.mukhin.ru/stroysovet/funds/35.html> (date of application: 24.07.2023). (rus).
10. Dashevskiy M.A., Motorin V.V., Mamazhanov M.A. Vibrozashchita krupnopanel'nykh zdaniy. [Vibration protection of large-panel buildings] // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2004. No. 10. [Online]. <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-vibrozaschity-zdaniy-i-sooruzheniy-v-polestroitelnyh-normativov-rf/viewer> (date of application: 24.07.2023). (rus).
11. Trifunac M.D., Ivanovic S.S., Todorovska M.I. Wave propagation in a seven-story reinforced concrete building: III Damage detection via changes in wavenumbers // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2003. Vol.23. Iss. 1. Pp. 65-75.
12. Mickaitis M., Stauskis V.J. Vibration transmission through joints of walls and columns in frame buildings // Journal of civil engineering and management. 2005. Vol. XI. No. 3. Pp. 185-191.
13. Alyavdin P.V., Muzychkin YU.A. Vibratsiya konstruktivnykh karkasnykh zdaniy, vyzvannaya dvizheniyem poyezdov metropolitena [Vibration of frame building structures caused by the movement of subway trains] Vestnik Belorusskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta : nauchno-tekhnicheskii zhurnal. 2011. No. 2. Pp. 5-9. (rus).
14. Dashevskiy M.A., Mondrus V.V., Motorin V.V., Sizov D.K.. Vibrozashchita zdaniy [Vibration protection of buildings]. Moscow: Iz-vo LLC «Sam Poligrafist», 2021. 252 p.
15. Mondrus V.L., Sizov D.K., Khuen L.T.T. Snizheniye urovnya seysmicheskogo vozdeystviya pri dvizhenii grunta osnovaniya s ispol'zovaniyem seismoizolyatorov [Reducing the level of seismic impact during the movement of the foundation soil using seismic isolators] Stroitel'nyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XIX veka. 2011. No. 1(144). Pp. 48-49. (rus).
16. Balakin P.D., Krasotina L.V., Krivtsov A.V. Modelirovaniye raboty rezinometallicheskogo vibroizolyatora [Modeling the operation of a rubber-metal vibration isolator] Omskiy nauchnyy vestnik. 2016. No. 3 (147). Pp. 5-9.

17. Fedorova A.S. Raschet sistem vibroizolyatsii v tom chisle s nelineynymi kharakteristikami [Calculation of vibration isolation systems, including those with non-linear characteristics] // Dni studencheskoy nauki Sbornik dokladov nauchno-tehnicheskoy konferentsii po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot studentov instituta stroitel'stva i arkhitektury NIU MGSU (13-17 marta 2017). 2017. Pp. 871-874. ISBN 978-5-7264-1604-5. (rus).
18. Zhixing Li, Jingjun Lou, Shijian Zhu and Simi Tang, Simulation on performance of rubber isolator based on ANSYS, 2011 // Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, Inner Mongolia, China. 2011. Pp. 1608-1611. doi:10.1109/MACE.2011.5987260
19. Dashevskiy M.A. Inzhenernyy metod nelineynogo rascheta rezinometallicheskich vibroizolyatorov dlya zdaniy [Engineering method for non-linear calculation of rubber-metal vibration isolators for buildings] Seysmostoykoye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy. 2006. No. 6. Pp. 37-41. (rus).
20. Shimkovich D.G. Raschet konstruktsiy v MSC/Nastran for Windows. [Structural Analysis in MSC/Nastran for Windows] Moscow: DMK Press, 2003. 448 p. (rus).
21. Basov K.A. ANSYS Spravochnik pol'zovatelya [ANSYS User Manual]. Moscow: DMK Press. 2014. 640 p. (rus).
22. Basov K.A. ANSYS V primerakh i zadachakh. [ANSYS In examples and tasks] Moscow: ComputerPress. 2002. 224 p. (rus).

Информация об авторах:

Мондрус Владимир Львович

НИУ МГСУ «Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия, доктор технических наук, член-корр. РААСН, заведующий кафедрой «Строительная и теоретическая механика», и.о. президента Eurasian SEISMO Association (EASA).

E-mail: mondrus@mail.ru

Сизов Дмитрий Константинович

НИУ МГСУ «Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительная и теоретическая механика».

E-mail: newfff@mail.ru

Акимова Ирина Валерьевна

ООО «ВИБРОСЕЙСМОЗАЩИТА», г. Москва, Россия, ведущий инженер.

E-mail: vibroprotect@mail.ru

Information about authors:

Mondrus Vladimir L.

NRU MGSU «Moscow State Construction University», Moscow, Russia, Professor, Corresponding Member RAASN, Head of the Department of Construction and Theoretical Mechanics, NRU MGSU, acting President of the Eurasian SEISMO Association (EASA).

E-mail: mondrus@mail.ru

Sizov Dmitry K.

NRU MGSU «Moscow State Construction University», Moscow, Russia, candidate of technical science, associate professor of the department of Construction and Theoretical Mechanics.

E-mail: newfff@mail.ru

Akimova Irina V.

LLC "VIBROSEISMOZASCHITA", Moscow, Russia, leading engineer.

E-mail: vibroprotect@mail.ru