

<http://doi.org/10.58225/sw.2023.2-141-149>

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ С ОТВЕРСТИЯМИ В РЕЗИНОВЫХ СЛОЯХ

Мондрус Владимир Львович- д.т.н., профессор, член-корр. РААСН, заведующий кафедрой «Строительная и теоретическая механика» НИУ МГСУ, и.о. президента Eurasian SEISMO Association (EASA), mondrus@mail.ru, тел

Сизов Дмитрий Константинович- к.т.н., доцент, кафедры Строительная и теоретическая механика НИУ МГСУ, newfff@mail.ru

Квасников Тимофей- аспирант, кафедры Строительная и теоретическая механика» НИУ МГСУ, tima.kvasnikov@gmail.com

Аннотация: В статье 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 существенно 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 ярковыраженных 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.

FEATURES OF THE CALCULATION OF RUBBER-METAL VIBRATION ISOLATORS WITH HOLES IN THE RUBBER LAYERS

Mondrus Vladimir Lvovich- doctor of tech.sc., prof., Corresponding Member. RAASN, Head of the Department of Construction and Theoretical Mechanics, NRU MGSU, acting President of the Eurasian SEISMO Association (EASA), mondrus@mail.ru

Sizov Dmitry Konstantinovich- candidate of tech.sc., ass.prof., Department of Construction and Theoretical Mechanics, NRU MGSU, newfff@mail.ru

Kvasnikov Timofey- post-graduate student, Department of Construction and Theoretical Mechanics, NRU MGSU, tima.kvasnikov@gmail.com

Annotation: The article describes 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. 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 significantly 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 in the compressed rubber layers, the effect of the formation of pronounced zones of all-round compression was 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 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 practice for given dimensions of the vibration isolator in plan, and, on the other hand, to minimize the rigidity of the system, thus increasing the effectiveness of vibration protection events.

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

Введение. В современном строительном комплексе используется 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 [1,2]. Люди, подверженные повторяющемуся вибрационному воздействию, испытывают значительные стрессы, чаще болеют и утомляются, просходит 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, регламентирующем 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 вибрационного воздействия, 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.

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 [3]. 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 отметке 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 следующем рисунке.



Рис.1. Внешний вид установленного в проектное положение четырехслойного резинометаллического виброизолятора на одном из объектов в Москве [3]

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 [4,5].

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 стремя-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 [3].

Методы исследования. 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 Рис. 2.

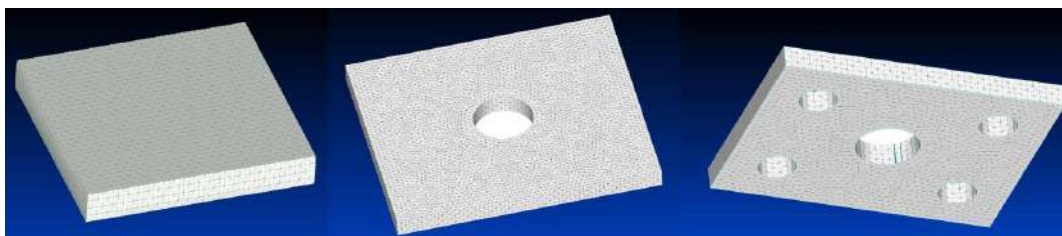


Рис 2. Характерные конечно-элементные модели рассматриваемой линейки виброизоляторов (показаны модели, соответствующие резиновому слою 450х350х40 мм) [5]

Аналогично рассмотрены три модели трехслойного резинометаллического виброизолятора с одной и пятью перфорациями. Внешний вид МКЭ моделей трехслойного виброизолятора показан на Рис.3. Стальные армирующие слои не имеют перфораций в местах расположения отверстий в резиновых слоях.

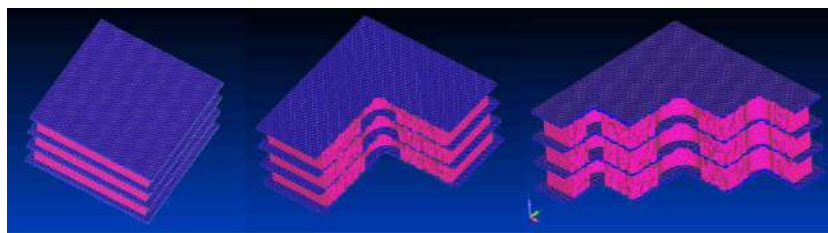


Рис 3. Конечно-элементные модели трехслойных виброизоляторов (двух перфорированных и полнотелого) [5]

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 Рис.4.

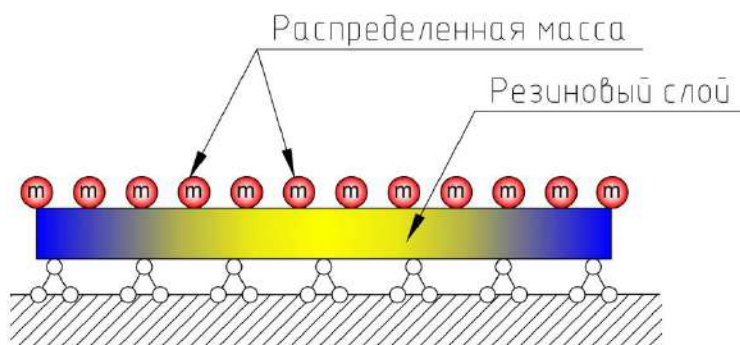


Рис 4. Расчетная схема для определения собственных частот нагруженных резинометаллических виброизоляторов [5]

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 [6], к конечноэлементным 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 и обсуждения. 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 приводятся в Таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчета для виброизоляторов без перфораций [6]

№ п.п.	Размеры	Величина вертикальной реакции, тс.	Первая собственная частота, Гц
1	450x350x40 мм	108,01 тс	11,71 Гц
2	450x300x40 мм	84,19 тс	12,85 Гц
3	450x350x30 мм	114,04 тс	12,92 Гц
4	450x250x30 мм	67,10 тс	14,24 Гц
5	450x150x30 мм	26,32 тс	15,96 Гц
6	450x480x40 мм	122,67 тс	13,21 Гц
7	450x480x30 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, обладающий вытянутой формой и большим соотношением площади свободной боковой поверхности к площади опорных плоскостей. Данную ситуацию иллюстрирует приведенные на следующем рисунке изополя напряжения сжатия, действующего на горизонтальных площадках верхней грани.

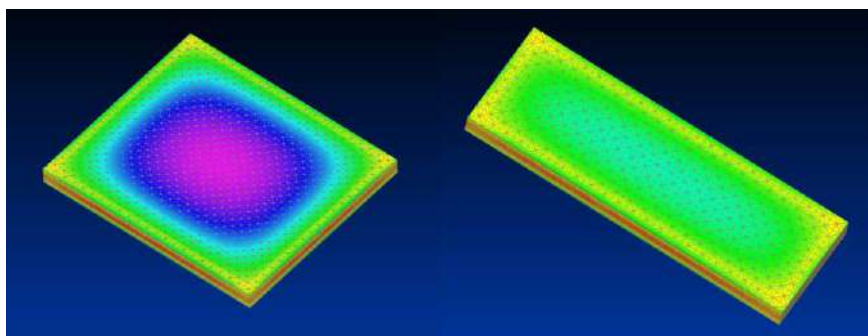


Рис 5. Расположение зоны всестороннего сжатия внутри резинометаллических виброизоляторов с различными габаритами в плане [6]

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

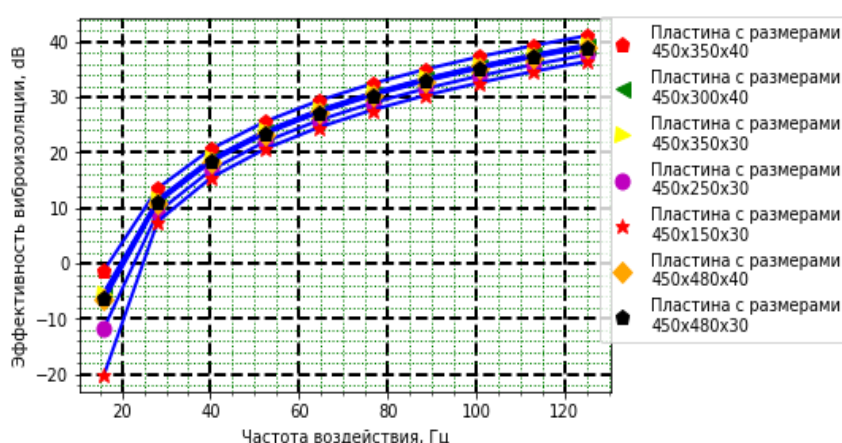


Рис 6. Ожидаемая эффективность виброизоляции для полнотелых виброизоляторов для различных частот внешнего воздействия [6]

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

Наличие перфораций значительно изменило картину распределения напряжений внутри виброизолятора, зона всестороннего сжатия уменьшилась и стала значительно менее выраженной.

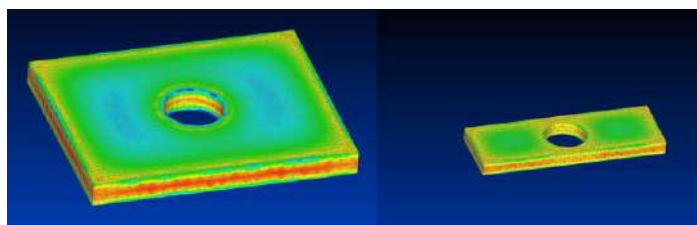


Рис 7. Расположение зоны всестороннего сжатия для виброизоляторов с одним отверстием [6]

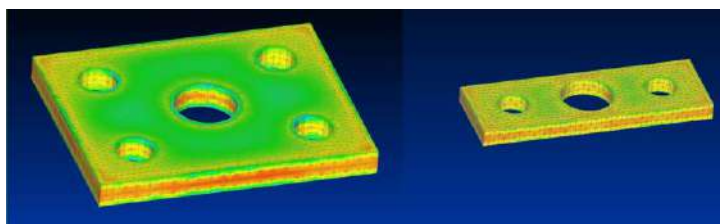


Рис.8. Расположение зоны всестороннего сжатия для виброизоляторов с несколькими отверстиями [6]

Таблица 2. Результаты расчета для виброизоляторов с одной перфорацией [6]

№ 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 отверстиями [6]

№ 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.

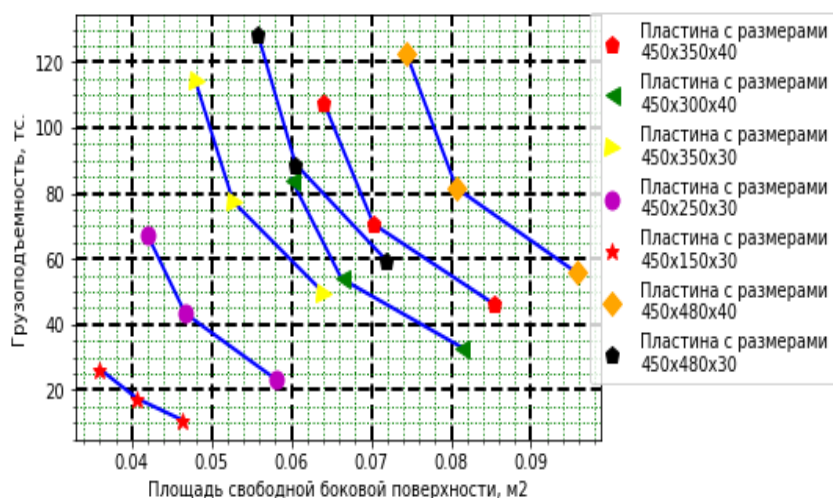


Рис. 9. Графики зависимости несущей способности виброизолятора от площади свободной поверхности [6]

Также как и для виброизоляторов без отверстий для перфорированных виброизоляторов возможно построить графики теоретической эффективности виброзащиты, рассматривая простейшую модель одномассового осциллятора Рис. 10 и Рис. 11.

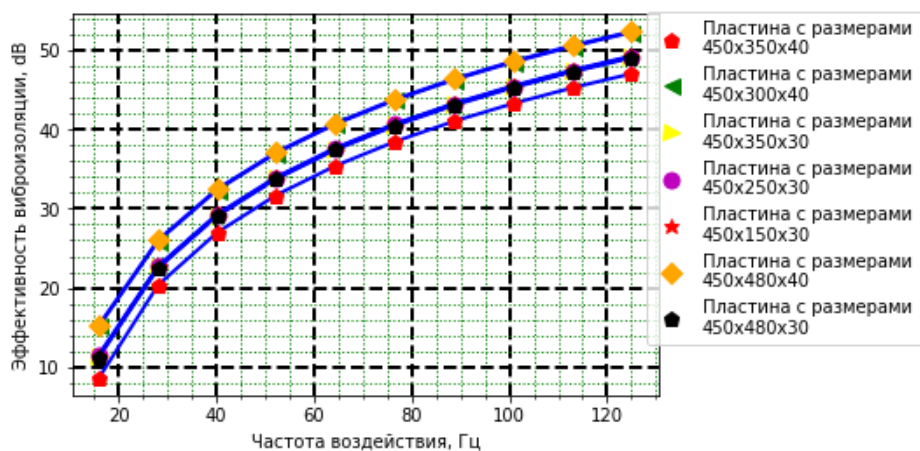


Рис. 10. Ожидаемая эффективность виброизоляции для виброизоляторов с одним центральным отверстием для различных частот внешнего воздействия [8]

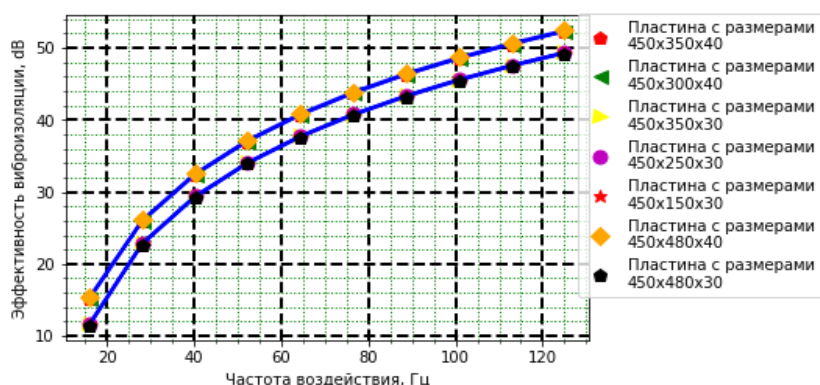


Рис. 11. Ожидаемая эффективность виброизоляции для виброизоляторов с несколькими (3 и 5) отверстиями для различных частот внешнего воздействия [6]

Для трехслойного виброизолятора с отверстиями и без также были получены значения несущей способности и значения собственных частот. 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.

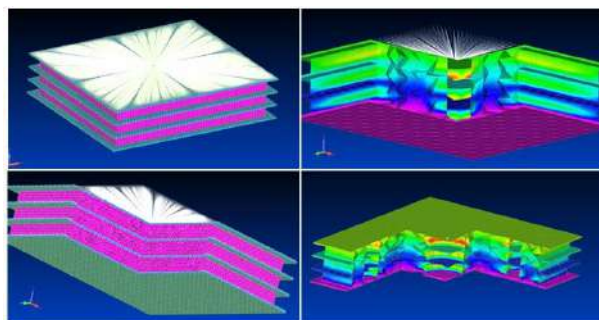


Рис. 12. Конечно-элементные модели трехслойного виброизолятора с Rigid элементами (независимый узел Rigid элемента соединен с элементом массы) [6]

Таблица 4. Результаты расчета многослойного виброизолятора [6]

№ 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

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

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

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

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

В многослойном виброisolаторе 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.

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), Москва, 2004, №3
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.
3. Виброзащита зданий / М.А. Дашевский, В.В. Мондрус, В.В. Моторин, Д.К. Сизов. Москва: Из-во ООО

Məqaləyə istinad: Мондрус В.Л., Сизов Д.К., Квасников Т. Особенности расчета резинометаллических виброизоляторов с отверстиями в резиновых слоях . Elmi Əsərlər jurnalı/ Scientific works. AzMİU, s. 141-149, N2, 2023

For citation: Mondrus V.L., Sizov D.K., Kvasnikov T. Features of the calculation of rubber-metal vibration isolators with holes in the rubber layers. Elmi Əsərlər jurnalı/ Scientific works. AzUAC, p. 141-149, N2, 2023

Məqalə INTERNATIONAL CONGRESS ON ADVANCED EARTHQUAKE RESISTANT STRUCTURES (AERS2023) adlı konfrans materialıdır.