



УДК 624.04:519.62

DOI: 10.22227/2949-1622.2023.4.43-51

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/ RESEARCH ARTICLE

Расчет резинометаллических виброизоляторов с отверстиями в системе виброзащиты зданий с помощью программного комплекса, реализующего метод конечных элементов

В.Л. Мондрус¹, Д.К. Сизов^{2*}, Т.М. Квасников¹

¹ *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация*

² *ООО «Вибросейсмозащита», Москва, Российская Федерация*

* tima.kvasnikov@gmail.com

Ключевые слова: виброизоляция, виброизолятор с отверстиями, резинометаллический виброизолятор, конечно-элементные модели резинометаллического виброизолятора, виброизолятор без отверстий.

История статьи

Поступила в редакцию: 02.07.2023

Доработана: 12.07.2023

Принята к публикации: 19.07.2023

Для цитирования

Мондрус В.Л., Сизов Д.К., Квасников Т.М. Расчет резинометаллических виброизоляторов с отверстиями в системе виброзащиты зданий с помощью программного комплекса, реализующего метод конечных элементов // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 4. № 4. С. 43–51.

Аннотация. В статье представлен расчет с использованием программного комплекса, реализующего метод конечных элементов, резинометаллических виброизоляторов с 5 отверстиями различного диаметра. Проведен сравнительный анализ собственных частот резинометаллических виброизоляторов с 5 отверстиями (одно в центре, 4 симметрично по углам) и без таковых. Построены конечно-элементные модели резинометаллического виброизолятора с отверстиями и без отверстий, а также, проанализированы их характеристики. Результаты показывают, что виброизоляторы с несколькими симметрично расположенными сквозными отверстиями превосходят по ряду параметров виброизоляторы без отверстий, а, следовательно, могут применяться для виброизоляции зданий, особенно в случае отложенного монтажа виброзащиты.

Finite Element Modelling of Rubber-Metal Vibration Isolators with Holes for the Vibration Protection System of Buildings

Vladimir L. Mondrus^{1*}, Dmitry K. Sizov^{2*}, Timofei M. Kvasnikov^{1*}

¹ *Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Russian Federation*

² *ООО "Vibroiseizmochita", Moscow, Russian Federation*

* tima.kvasnikov@gmail.com

Владимир Львович Мондрус, Член-корреспондент РААСН, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой строительной и теоретической механики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 3268-4484, Scopus: 55976017400, ResearcherID: AFO-1600-2022, E-mail: MondrusVL@mgsu.ru

Дмитрий Константинович Сизов кандидат технических наук, доцент, ООО «Вибросейсмозащита», 109341 Москва, ул. Братиславская, 6; eLIBRARY SPIN-код: 4499-6656, Scopus: 57192559647, E-mail: vibroprotect@mail.ru

Тимофей Михайлович Квасников аспирант кафедры строительной и теоретической механики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 3751-3429, Scopus: 57209806878, ORCID: 0000-0002-7836-4918, E-mail: tima.kvasnikov@gmail.com

© Мондрус В.Л., Сизов Д.К., Квасников Т.М., 2023



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Keywords: vibration isolation, vibration isolator with holes, rubber-metal vibration isolator, finite element models of rubber-metal vibration isolator, vibration isolator without holes.

Article history

Received: 02.07.2023

Revised: 12.07.2023

Accepted: 19.07.2023

For citation

Mondrus V.L., Sizov D.K., Kvasnikov T.M. Finite Element Modelling of Rubber-Metal Vibration Isolators with Holes for the Vibration Protection System of Buildings. *Reinforced concrete structures*. 2023;4(4):43–51.

Abstract. The article presents a calculation of rubber-metal vibration isolators with five holes of different diameters using a software package that implements the finite element method. A comparative analysis of the Eigen frequencies of rubber-metal vibration isolators with five holes (one in the center, 4 symmetrically at the corners) and without holes is presented. Finite element models of a rubber-metal vibration isolator with and without holes are modeled, and their characteristics are analyzed. The results show that vibration isolators with several symmetrically located holes have several advantages in a number of parameters to vibration isolators without holes, and, therefore, can be used for vibration isolation of buildings, especially in the case of delayed installation of vibration protection.

ВВЕДЕНИЕ

С быстрым развитием городской застройки, проблемы вибрации, передаваемой на здания и сооружения, вызванные движением поездов метрополитена неглубокого заложения, становятся все более заметными. В то же время, по мере того как потребность людей в улучшении качества жизни продолжает расти, все более высокие требования предъявляются к защите от вибраций, вызванных внешними факторами, а исследования экологических проблем, вызванных вибрациями поездов привлекли значительное внимание ученых [1-4].

Резинометаллические виброизоляторы представляют собой часть системы виброизоляции, которая обычно используется при изоляции зданий и сооружений. Однослойные виброизоляторы представляют из себя три пластины, из которых две металлические – армирующие, одна из которых расположена на фундаменте, а средняя - упругий резиновый слой. Для поглощения вибраций применен резиновый слой изолятора. Так как резинометаллические виброизоляторы – это пассивная изоляция, защита конструкции происходит без подвода дополнительного источника энергии.

МЕТОД

В данной статье рассмотрено использование метода конечных элементов (МКЭ) для расчета резинометаллического виброизолятора с помощью программного комплекса.

Метод конечных элементов включает в себя разделение сложной структуры на ряд более мелких и простых элементов, каждый из которых имеет известное поведение.

Для расчета резинометаллических виброизоляторов МКЭ используется при моделировании поведения резиновой опоры, поглощающей вибрации. Резиновая опора моделируется как ряд взаимосвязанных конечных элементов, каждый из которых имеет заданные известные жесткость и коэффициент демпфирования [5-6].

Vladimir L. Mondrus, Corresponding member of RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Structural and Theoretical Mechanics, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, eLIBRARY SPIN-код: 3268-4484, Scopus: 55976017400, ResearcherID: AFO-1600-2022, E-mail: MondrusVL@mgsu.ru

Dmitry K. Sizov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor, ООО "Vibrozeismozastchita", Bratislavskaya st. 6, Moscow 10934, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-код: 4499-6656, Scopus: 57192559647, E-mail: vibroprotect@mail.ru

Timofei M. Kvasnikov, graduate student of the Department of Structural and Theoretical Mechanics, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-код: 3751-3429, Scopus: 57209806878, ORCID: 0000-0002-7836-4918, E-mail: tima.kvasnikov@gmail.com

Одним из важных преимуществ использования МКЭ для моделирования поведения резинометаллических изоляторов является возможность точного прогнозирования поведения системы в широком диапазоне нагрузок, а также возможность оптимизации конструкции системы.

Варьирование коэффициентов жесткости и демпфирования, позволяет найти оптимальную конструкцию виброизолятора для требуемых нагрузок. Это может привести к созданию эффективных и экономичных конструкций, способных наилучшим образом противостоять воздействию вибрации.

Одним из наиболее существенных недостатков применения МКЭ является потребность в точных данных о поведении резинового тела. Эти данные довольно проблематично получить, а ошибки в исходных данных могут привести к неточным вычислениям поведения всей системы.

Расчетные формулы для резинометаллических виброизоляторов уже существуют, но они вовсе не учитывают влияние центральных и радиальных отверстий в виброизоляторах. В данной работе представлены конечно-элементные модели обоих типов виброизоляторов (с отверстиями и без отверстий) для дальнейшего их сравнения [7].

Информативно показано, что наличие отверстий приводит к уменьшению приведенного объемного модуля упругости и существенному увеличению сдвиговых деформаций. Отверстия в виброisolаторе позволяют частично рассеивать энергию вибрации за счет снижения жесткости системы, обеспечивая дополнительное демпфирование, тем самым снижая уровень вибрации, воспринимаемой конструкцией здания [8].

Для реализации метода конечных элементов в программном комплексе, для начала требуется смоделировать геометрию объекта расчета и задать свойства материалов резинометаллического изолятора. После определения геометрии и свойств материала программный комплекс используется для создания сетки, а ее качество может оказать существенное влияние на точность результатов, и важно создать сетку, которая будет одновременно точной и эффективной.

Основы создания сетки включают определение размера и формы элементов, а также связи между элементами. Размер элементов сетки определяется геометрией конструкции и желаемым уровнем точности, а связность между ними определяется геометрией и требуемым уровнем непрерывности.

Одним из преимуществ использования программного комплекса, реализующего МКЭ, для построения сетки является то, что он предоставляет мощные инструменты для уточнения сетки. Программный комплекс обладает функцией для уточнения сетки в областях, где требуется большая точность, и для огрубления сетки в областях, где требуется меньшая точность. Это позволяет оптимизировать сетку при расчете как для точности, так и для эффективности вычислений.

Программный комплекс используется для решения уравнений для каждого элемента сетки после того, как определена геометрия и заданы свойства материалов. То есть определяется матрица жесткости, матрица демпфирования и матрица масс для каждого элемента, а затем происходит их объединение для получения общего поведения конструкции.

Существует большое количество статей, посвященных исследованиям систем виброизоляции с применением МКЭ.

В статье [9] показано использование программного комплекса FEMAP для моделирования поведения изолированных от фундамента конструкций при сейсмической нагрузке. Авторы делают вывод об эффективности программного комплекса FEMAP при прогнозировании поведения таких типов конструкций и потенциальные преимущества при использовании систем изоляции основания для сейсмической защиты.

В статье [10] описывается использование FEMAP и ANSYS для моделирования поведения резинометаллических изоляторов при различных условиях нагрузки.

В целом, исследование систем виброизоляции с использованием МКЭ в программных комплексах является актуальной темой, по которой написано достаточное количество статей. Это демонстрирует эффективность программных комплексов в точном прогнозировании поведения различных систем виброизоляции и потенциальные преимущества использования программных комплексов для расчета.

Авторы настоящей статьи ставят перед собой цель в будущих своих исследованиях использовать язык программирования Python для проведения расчета и сравнительного анализа результатов.

Геометрические характеристики

Для поиска возможных новых решений по улучшению характеристик резинометаллических виброизоляторов разработаны два варианта изолятора. Первый представляет собой традиционный прямоугольный виброизолятор (Рис. 1), второй разработан на основе первого типа, но с продельванием центрального отверстия, а также с четырьмя радиальными симметрично расположенными отверстиями (Рис.2) [11].

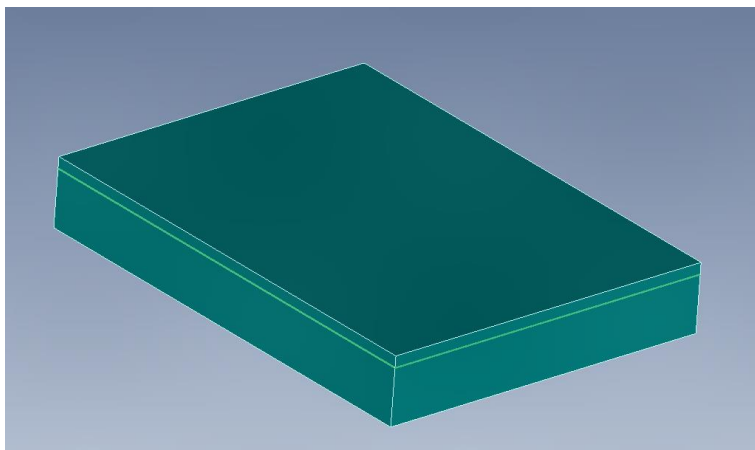


Рисунок 1. Модель резинометаллического виброизолятора без отверстий
Figure 1. Model of rubber-metal vibration isolator without holes

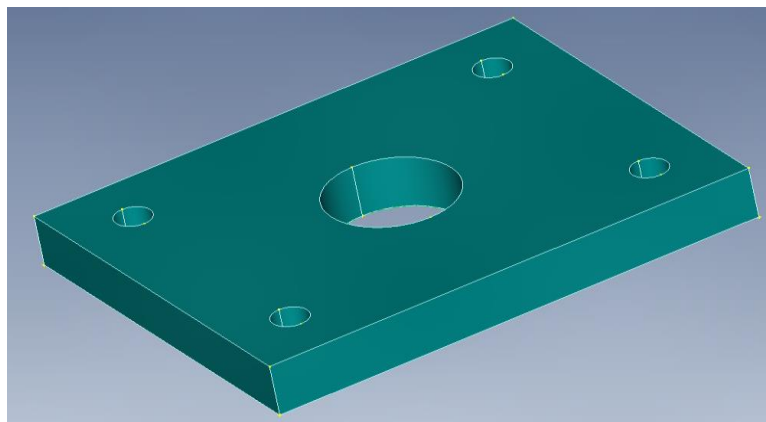


Рисунок 2. Модель резинометаллического виброизолятора с пятью отверстиями
Figure 2. Model of a rubber-metal vibration isolator with five holes

Геометрические размеры обоих виброизоляторов составляют 300x400x100 мм. Второй виброизолятор имеет 4 отверстия диаметром 20 мм и одно центральное отверстие диаметром 50мм (Рис.3).

Подбор оптимального диаметра отверстий будет предметом дальнейших исследований авторов.

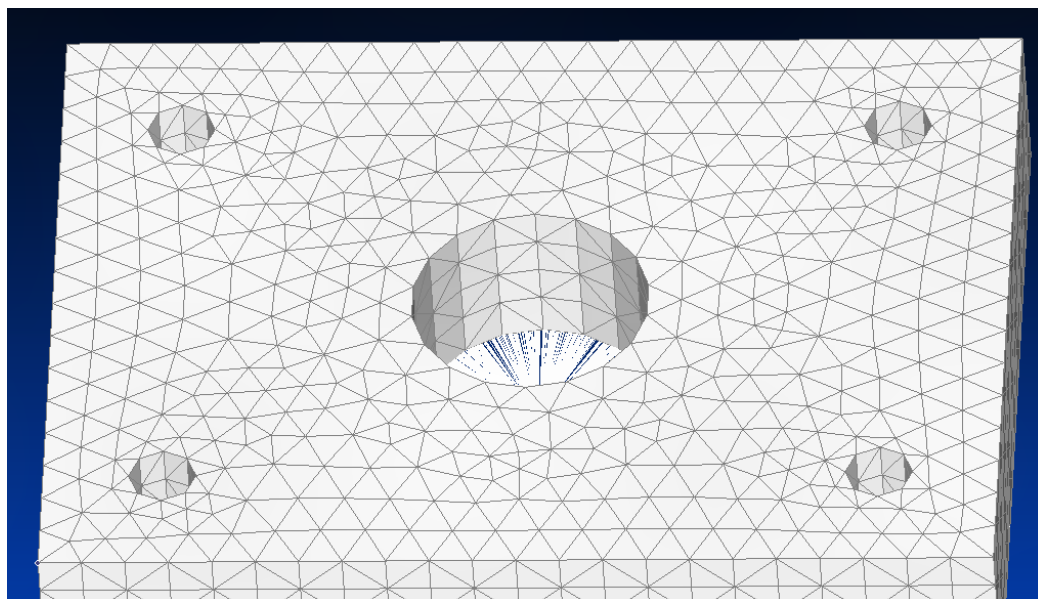


Рисунок 3. Вид сетки виброизолятора с пятью отверстиями
Figure 3. View of the grid of the vibration isolator with five holes

Характеристики материалов

Резина моделируется с характеристиками модуля упругости $E = 1000000$ Па, коэффициента Пуассона $\nu = 0,4$. Сталь моделируется с характеристиками модуля упругости $E = 3.E+12$, коэффициента Пуассона $\nu = 0,25$. Компоненты изолятора, включая стальные прокладки, резиновые слои, были смоделированы как твердотельные элементы.

В данной работе применен тетраэдральный конечный элемент. Шаг сетки для обоих видов виброизоляторов принят одинаковым 10 мм (для возможности проведения корректного сравнения). Происходит уменьшение размера конечных элементов (увеличение точности расчета) вокруг отверстий.

Ступение сетки и уменьшение размеров конечных элементов около отверстий вызвано необходимостью увеличить точность расчета в соответствующих местах (рис. 4).

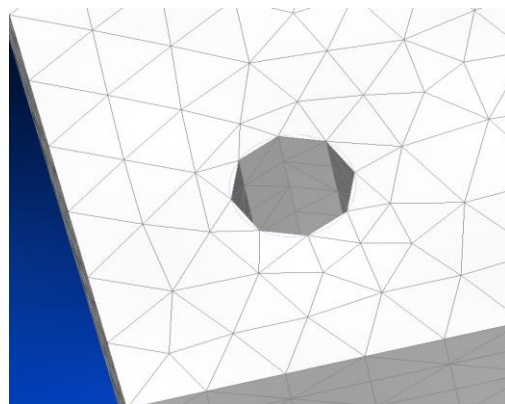


Рисунок 4. Ступение сетки конечных элементов вокруг отверстий виброизолятора
Figure 4. Thickening of the finite element mesh around the holes of the vibration isolator

Виброизолятор закреплен по нижней части и на верхней грани, кроме вертикальных перемещений (рис. 5).

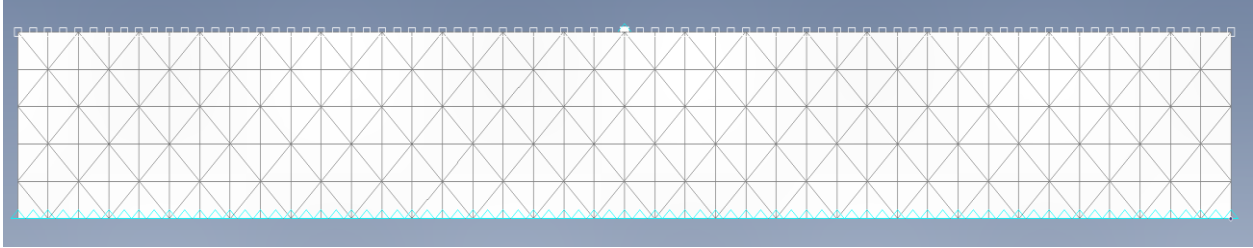


Рисунок 5. Закрепления резинометаллического виброизолятора на гранях (голубой и белый цвета)
Figure 5. Fixing rubber-metal vibration isolator on the edges (blue and white)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения собственных частот был проведен модальный анализ. Результаты анализа приведены в Таблице 1, а также показаны на рис. 6-10.

Таблица 1

Сравнение собственных частот исследуемых виброизоляторов

Собственная частота, №	Частота, Гц				
	1	2	3	4	5
Виброизолятор без отверстий	5.59	18.31	63.04	115.15	198.42
Вироизолятор с отверстиями	5.33	15.63	55.22	101.39	180.77

Table 1

Comparison of Eigen frequencies of the investigated vibration isolators

Eigen frequencies, no	Frequency, Hz				
	1	2	3	4	5
vibration isolators without holes	5.59	18.31	63.04	115.15	198.42
vibration isolators with 5 holes	5.33	15.63	55.22	101.39	180.77

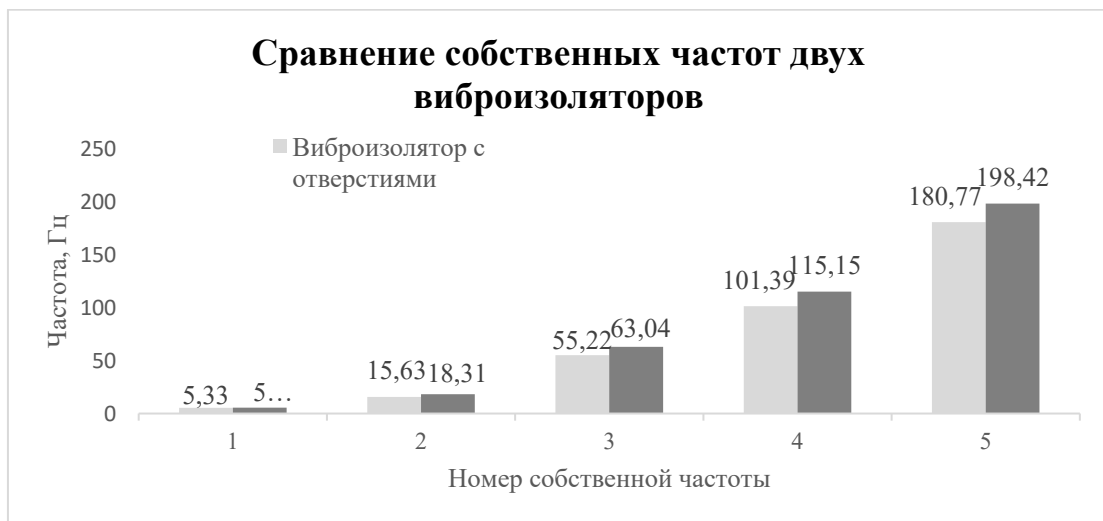


Рисунок 6. Диаграмма сравнения собственных частот
Figure 6. Eigen frequency comparison diagram

При расчете резинометаллических виброизоляторов в основном необходимо определение первой собственной частоты, более высокие собственные формы энергетически не так выгодны и из-за этого крайне редко реализуются на практике. Для прикладного применения виброизоляторов и корректного расчета нахождения остальных собственных частот не требуются, так как они выше частот воздействия. Ниже приведены сравнительные результаты анализа двух виброизоляторов.

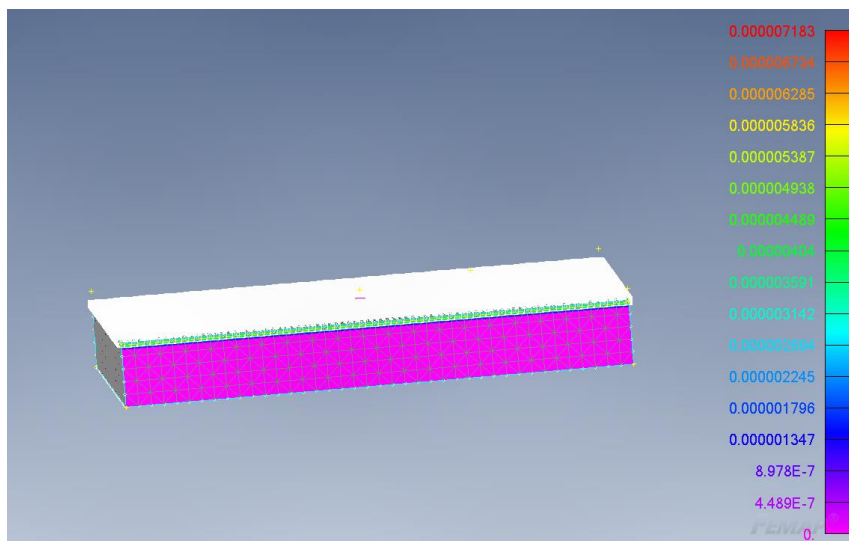


Рисунок 7. Недеформированный виброизолятор без отверстий
Figure 7. Undeformed vibration isolator without holes

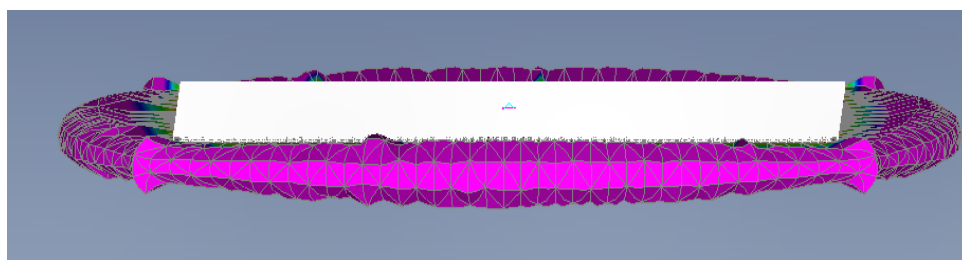


Рисунок 8. Результат модального анализа резинометаллического виброизолятора без отверстий
Figure 8. The result of the modal analysis of a rubber-metal vibration isolator without holes

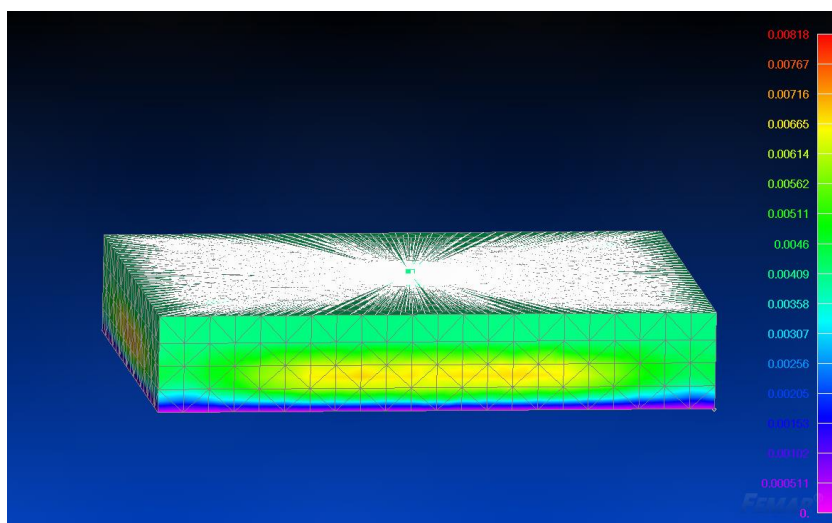


Рисунок 9. Недеформированный виброизолятор с пятью отверстиями
Figure 9. Non-deformed vibration isolator with five holes

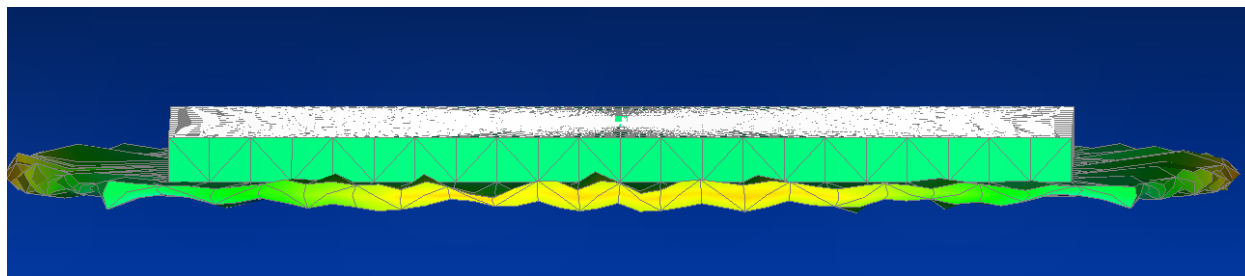


Рисунок 10. Результат модального анализа резинометаллического виброизолятора с пятью отверстиями
Figure 10. Result of modal analysis of rubber-metal vibration isolator with five holes

Частоты собственных колебаний изоляторов определяются их сжатием (величиной осадки), поэтому большинство используемых на практике виброизоляторов обладают зачастую одной и той же частотой. Таким образом, наличие отверстий приводит к возможности сжатия виброизоляторов до больших величин осадок, но при той же осадке частоты и не должны сильно отличаться. У виброизолятора с отверстиями и у виброизолятора без отверстий при одной и той же величине сжатия теоретически должна быть примерно одна и та же частота, то есть наличие отверстий как раз позволяет сжать изолятор и, таким образом, достичь большей эффективности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для улучшения характеристик традиционного резинометаллического виброизолятора авторами предложена модификация виброизолятора путем проделывания в нем пяти отверстий.

Эффективность виброизоляции анализируется с помощью модального анализа. Результаты показывают, что виброизолятор с отверстиями имеет меньшую частоту, но при этом происходит падение несущей способности, а также значительное снижение вибрации, по сравнению с виброизолятором без отверстий. Найденная частота позволяет говорить о достаточном повышении эффективности виброизоляции, за счет более "мягкой конструктивной системы" с учетом виброизоляторов, то есть происходит уход от "жесткого случая", когда резина не работает как упругий материал.

Наибольшая эффективность виброизолятора с отверстиями достигается при работе совместно с виброизоляторами без отверстий, особенно если работает система заменяемого виброизолятора для отладки окончательной вывески здания на виброизоляторы. В целом влияние систем виброизоляции на психофизическое здоровье людей является значительным.

Таким образом, у резинометаллического виброизолятора присутствуют свои преимущества, но требуется дополнительный анализ для определения оптимального диаметра отверстий и их наиболее подходящего расположения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fang L., Yao J., Xia H. Prediction on soil-ground vibration induced by high-speed moving train based on artificial neural network model [Прогноз вибрации почвы от грунта, вызванной высокоскоростным движущимся поездом, на основе модели искусственной нейронной сети] // *Advances in Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 11. no. 5.
2. Sheng X., Jones C.J.C., Thompson D.J. Prediction of ground vibration from trains using the wavenumber finite and boundary element methods [Прогноз вибрации грунта от поездов с использованием методов конечных и граничных элементов по волновым числам] // *Journal of Sound and Vibration*. 2006. Vol. 293. no. 3-5.
3. Thompson D.J., Jones C.J.C. A review of the modelling of wheel/rail noise generation [Обзор моделирования генерации шума колес рельс] // *Journal of Sound and Vibration*. 2000. Vol. 231. no. 3.
4. Yao J., Zhao R., Zhang N., Yang D. Vibration isolation effect study of in-filled trench barriers to train-induced environmental vibrations [Изучение влияния виброизоляции засыпных траншейных ограждений на вибрации окружающей среды, вызванные поездом] // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2019. vol. 125.

5. Bark H., Markou G. Implementation of a Nonlinear Soil Material Model into a FEA Framework for the Simulation of the Seismic Soil-Structure Interaction [Внедрение нелинейной модели грунтового материала в структуру МКЭ для моделирования сейсмического взаимодействия грунт-сооружение]. 2019. (Preprint)
6. Li Z., Lou J., Zhu S., Tang S. Simulation on performance of rubber isolator based on ANSYS [Моделирование работы резинового изолятора на базе ANSYS] // Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. 2011.
7. Sheng T., Liu G., Bian X., Shi W., Chen Y. Development of a three-directional vibration isolator for buildings subject to metro- and earthquake-induced vibrations [Разработка трехнаправленного виброизолятора для зданий, подверженных вибрациям, вызванным метрополитеном и землетрясением] // Engineering Structures. 2022. Volume 252, 1 February 2022, 113576.
8. Constantinou M.C., Kartoum A., Kelly J.M. Analysis of compression of hollow circular elastomeric bearings // Engineering Structures. 1992. Volume 14, Issue 2, Pp. 103-111.
9. Ceresa E., Nascimbene P. Modelling curved surface sliding bearings with bilinear constitutive law: effects on the response of seismically isolated buildings [Моделирование подшипников скольжения с криволинейной поверхностью с билинейным определяющим законом: влияние на реакцию сейсмически изолированных зданий] // Mater Struct. 2016. Vol. 49.
10. Yang J., Zhu S., Zhai W., Kouroussis G., Wang Y., Wang K. Prediction and mitigation of train-induced vibrations of large-scale building constructed on subway tunnel [Прогнозирование и смягчение вызванных поездом вибраций крупномасштабного здания, построенного в тоннеле метрополитена] // Science of The Total Environment. 2019. Volume 668, 10 June 2019, Pp. 485-499.
11. Osgoee M., Van Engelen C., Konstantinidis D., Tait J. Experimental and finite element study on the lateral response of modified rectangular fiber-reinforced elastomeric isolators (MR-FREIs) [Экспериментальное и конечно-элементное исследование боковой реакции модифицированных прямоугольных армированных волокном эластомерных изоляторов (MR-FRIEs)] // Engineering Structures. 2015. Volume 85. Pp. 293-303.

REFERENCES

1. 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.
2. 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.
3. Thompson D.J., Jones C.J.C. A review of the modelling of wheel/rail noise generation. *Journal of Sound and Vibration*. 2000. Vol. 231. no. 3.
4. Yao J., Zhao R., Zhang N., Yang D. Vibration isolation effect study of in-filled trench barriers to train-induced environmental vibrations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2019. vol. 125.
5. Bark H., Markou G. Implementation of a Nonlinear Soil Material Model into a FEA Framework for the Simulation of the Seismic Soil-Structure Interaction. 2019. (Preprint)
6. Li Z., Lou J., Zhu S., Tang S. Simulation on performance of rubber isolator based on ANSYS. Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. 2011.
7. Sheng T., Liu G., Bian X., Shi W., Chen Y. Development of a three-directional vibration isolator for buildings subject to metro- and earthquake-induced vibrations. *Engineering Structures*. 2022. Volume 252, 1 February 2022, 113576.
8. Constantinou M.C., Kartoum A., Kelly J.M. Analysis of compression of hollow circular elastomeric bearings. *Engineering Structures*. 1992. Volume 14, Issue 2, Pp. 103-111.
9. Ceresa E., Nascimbene P. Modelling curved surface sliding bearings with bilinear constitutive law: effects on the response of seismically isolated buildings. *Mater Struct*. 2016. Vol. 49.
10. Yang J., Zhu S., Zhai W., Kouroussis G., Wang Y., Wang K. Prediction and mitigation of train-induced vibrations of large-scale building constructed on subway tunnel. *Science of The Total Environment*. 2019. Volume 668, 10 June 2019, Pp. 485-499.
11. Osgoee M., Van Engelen C., Konstantinidis D., Tait J. Experimental and finite element study on the lateral response of modified rectangular fiber-reinforced elastomeric isolators (MR-FREIs). *Engineering Structures*. 2015. Volume 85. Pp. 293-303.