

УДК 62-752+534.64
EDN: MAPPHQ

В.В. Безъязычный, О.Н. Воинова, Н.А. Кузнецов, Д.Б. Кулижников,
С.В. Попков, Д.В. Щетинин
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ТОНКОСЛОЙНОГО РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является тонкослойный резинометаллический элемент – ТРМЭ. Цель состоит в измерении частотно-зависимых механических сопротивлений и динамических жесткостей ТРМЭ в осевом и радиальном направлениях.

Материалы и методы. Применены метод и схемы измерений механических сопротивлений тонкослойного резинометаллического элемента в осевом и радиальном направлениях.

Основные результаты. В графическом виде представлены результаты экспериментальных исследований механических сопротивлений и динамических жесткостей в осевом и радиальном направлениях.

Заключение. Полученные данные о спектральных динамических характеристиках тонкослойных резинометаллических элементов позволят выполнить расчеты динамических сил, колебательных мощностей и эффективностей амортизирующих креплений, включающих ТРМЭ, в широком частотном диапазоне.

Ключевые слова: амортизирующие конструкции, механические сопротивления, динамические жесткости, частоты собственных колебаний конструкций, динамические силы, колебательные мощности.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 62-752+534.64
EDN: MAPPHQ

V.V. Bezyazychny, O.N. Voinova, N.A. Kuznetsov, D.B. Kulizhnikov,
S.V. Popkov, D.V. Shchetinin
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

MECHANICAL RESISTANCE OF THIN RUBBER-METAL ELEMENT

Object and purpose of research. The object of study is a thin-layer rubber-metal element (TRME). The purpose of study is measurement of frequency-dependent mechanical resistances and dynamic stiffness of TRME in axial and radial directions.

Materials and methods. The study was performed as per common methods and approaches of axial and radial mechanical resistance measurements for thin rubber-metal elements.

Main results. Results of experimental studies of mechanical resistances and dynamic stiffness in axial and radial directions are presented in form of plots.

Conclusion. The obtained data on the spectral dynamic characteristics of thin rubber-metal elements will enable the calculations of dynamic forces, vibration powers and efficiencies of resilient mounts (including TRME-type ones) in a wide frequency band.

Keywords: resilient mounts, mechanical resistances, dynamic stiffness, natural vibration frequency, dynamic force, vibration power.

The authors declare no conflicts of interest.

Для цитирования: Безъязычный В.В., Воинова О.Н., Кузнецов Н.А., Кулижников Д.Б., Попков С.В., Щетинин Д.В. Исследование механических сопротивлений тонкослойного резинометаллического элемента. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 3(409): 109–116.

For citations: Bezyazychny V.V., Voinova O.N., Kuznetsov N.A., Kulizhnikov D.B., Popkov S.V., Shchetinin D.V. Mechanical resistance of thin rubber-metal element. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 3(409): 109–116 (in Russian).

Введение

Introduction

Экспериментальные методы исследования механизмов и установок как источников колебаний, определения эффективности систем виброизоляции и вибродемпфирования, а также выявления путей распространения колебаний от работающих механизмов по всем присоединенным к механизму конструкциям основаны на информации о динамических силах и потоках колебательной энергии.

В натурных условиях определение динамических сил, действующих при работе механизмов на опорные и неопорные связи, а также колебательных мощностей, излучаемых механизмами в системы виброизоляции и фундаменты, выполняется по данным о вибрации амортизирующих конструкций и значениях их механических сопротивлений [1]. Механические сопротивления большинства разрешенных к применению амортизирующих конструкций – амортизаторов, виброизолирующих гибких

рукавов и подвесок трубопроводов – были измерены и сведены в альбом [2].

В последнее время в амортизирующих конструкциях опорных и неопорных связей стали широко использоваться тонкослойные резинометаллические элементы – ТРМЭ. Они представляют собой гибкую неразъемную вставку в конструктивную систему, состоящую из гибкого элемента в виде набора жестко скрепленных между собой чередующихся слоев армирующих металлических тарелей и резины, к которому по граничным слоям привулканизированы опорные кольца. ТРМЭ имеет повышенную нагрузочную способность в осевом направлении и высокую податливость в радиальном направлении, на порядок отличающуюся от осевой. Эти элементы позволяют найти принципиально новые конструктивные решения в создании амортизирующих конструкций.

Результаты измерений механических сопротивлений и частотно-зависимых динамических жесткостей ТРМЭ.0004-000

Results of mechanical resistances and frequency-dependent dynamic stiffness measurements for TRME.0004-000

В настоящей статье приводятся результаты измерений механических сопротивлений и частотно-зависимых динамических жесткостей ТРМЭ.0004-000 на стенде ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Измерения проводились по методике РД ИМЯН. 102-2005 [3].

Входное механическое сопротивление \bar{Z}_{11} , Н·с/м, и передаточное механическое сопротивление \bar{Z}_{21} , Н·с/м, определяются по формулам:

$$\bar{Z}_{11}(\omega) = \frac{j\omega F_1(\omega)}{a_1(\omega)} \Big|_{\text{при } a_2 = 0}, \quad (1)$$

$$\bar{Z}_{21}(\omega) = \frac{j\omega F_2(\omega)}{a_1(\omega)} \Big|_{\text{при } a_2 = 0}, \quad (2)$$

где F_1, F_2 – динамические силы, Н, на входе и выходе испытуемой конструкции соответственно; a_1, a_2 – ускорения, м/с², на входе и выходе испытуемой конструкции соответственно; ω – круговая частота, рад/с.

Условия заторможенности для испытуемой конструкции ($a_2 = 0$) создаются массивным виброизолированным фундаментом стенда. Масса фундамента – 40 т, частота свободных колебаний массы фундамента на жесткости рессорных пружин – 2 Гц.

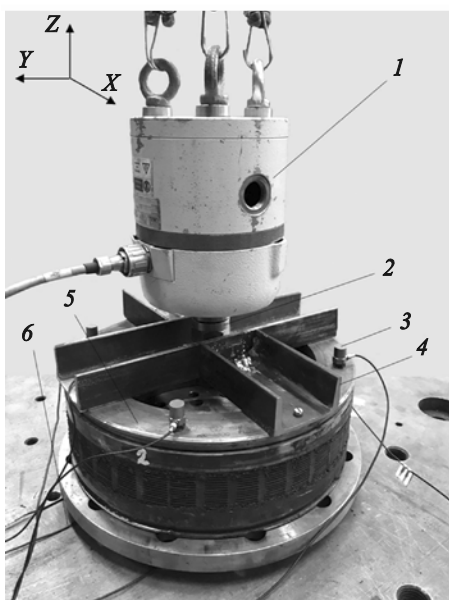


Рис. 1. Схема измерений механических сопротивлений ТРМЭ.0004-000 в осевом направлении: 1 – вибратор; 2 – преобразователь силы на входе; 3 – акселерометр; 4 – оснастка; 5 – тонкослойный резинометаллический элемент; 6 – преобразователь силы на выходе

Fig. 1. Axial mechanical resistance measurement setup for TRME.0004-000: 1 – vibrator; 2 – input force transducer; 3 – accelerometer; 4 – accessories; 5 – thin rubber element; 6 – output force transducer

Измерения механических сопротивлений ТРМЭ проводились по отношению к силам, действующим вдоль осей жесткости испытуемой конструкции $X(Y)$ и Z при однонаправленном искусственном возбуждении. Спектральная обработка сигналов с первичных преобразователей производилась с помощью многоканального анализатора спектра, осуществляющего процедуру быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Временные реализации сигналов с датчиков силы и акселерометров регистрировались анализатором спектра, работающим в режиме цифрового магнитофона, с последующей обработкой информации с целью получения спектральных характеристик вибрации, динамических сил и механических сопротивлений исследуемой конструкции. Измерения выполнялись при искусственном возбуждении синусоидальным сигналом с частотной модуляцией.

На рис. 1 представлена схема измерения механических сопротивлений вдоль оси жесткости Z ТРМЭ.0004-000 (осевое направление). Возбуждение колебаний осуществлялось электродинамическим вибратором, вывешенным на низкочастотном подвесе. Возмущающая сила действовала вдоль оси жесткости Z ТРМЭ. Для контроля однонаправленного возбуждения на входе испытуемой конструкции устанавливались 4 акселерометра по периметру ТРМЭ (позиция 3 на рис. 1). Ускорение на входе определялось как усредненное по точкам измерения (с учетом фазового угла) для выделения поршневой составляющей колебаний. Динамическая сила на входе измерялась датчиком силы, установленным под вибратором, на выходе – тремя датчиками силы с одинаковой чувствительностью.

Динамическое воздействие на испытуемую конструкцию осуществлялось через оснастку в виде т.н. крестовидной конструкции (позиция 4 рис. 1). В соответствии с методикой измерений [3] достоверный частотный диапазон измерений механических сопротивлений ограничивается собственными частотами оснастки. Для определения верхней границы частотного диапазона измерений механических сопротивлений ТРМЭ были выполнены оценки собственных частот колебаний оснастки при ее колебаниях в осевом и радиальном направлениях и определены формы колебаний оснастки. Расчет проводился методом конечных элементов. Оснастка моделировалась элементами типа «пластина» и закреплялась по всем степеням свободы в точках присоединения к испытуемой конструкции.

Первые три низшие частоты и формы собственных колебаний крестовидной конструкции оснастки приведены на рис. 2–4.

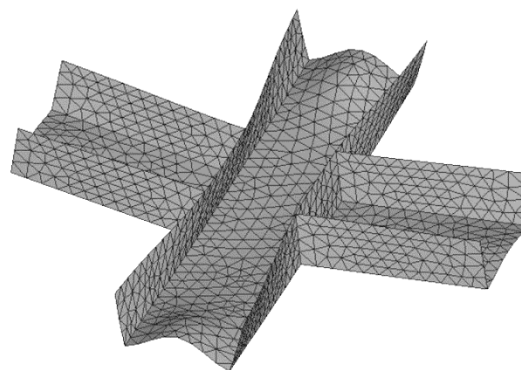


Рис. 2. Первая форма колебаний крестовидной конструкции на частоте 406 Гц

Fig 2. First mode of cross-shaped structure vibration at 406 Hz frequency

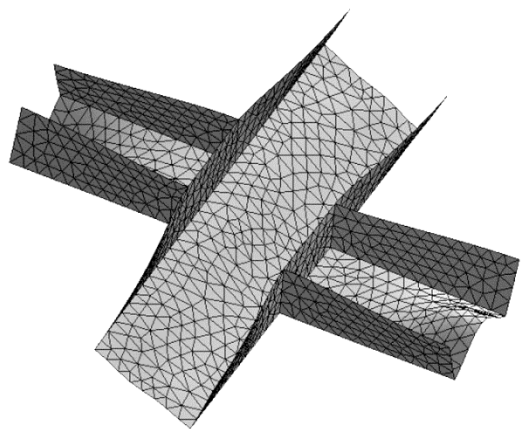


Рис. 3. Вторая форма колебаний крестовидной конструкции на частоте 509 Гц

Fig. 3. Second mode of cross-shaped structure vibration at 509 Hz frequency

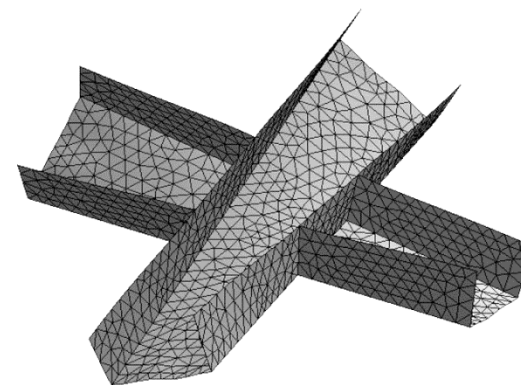


Рис. 4. Третья форма колебаний крестовидной конструкции на частоте 516 Гц

Fig. 4. Third mode of cross-shaped structure vibration at 516 Hz frequency

По результатам расчетов можно сделать следующие выводы:

- возбуждение элемента ТРМЭ до 400 Гц является практически синфазным вдоль осевого направления, и корректно использовать метод синфазного суммирования для выделения поршневой составляющей силового воздействия на элемент;

начиная со второй и третьей частоты собственных колебаний крестовидной конструкции воздействие на ТРМЭ через нее перестает быть поршневым в осевом направлении.

- начиная со второй и третьей частоты собственных колебаний крестовидной конструкции воздействие на ТРМЭ через нее перестает быть поршневым в осевом направлении.

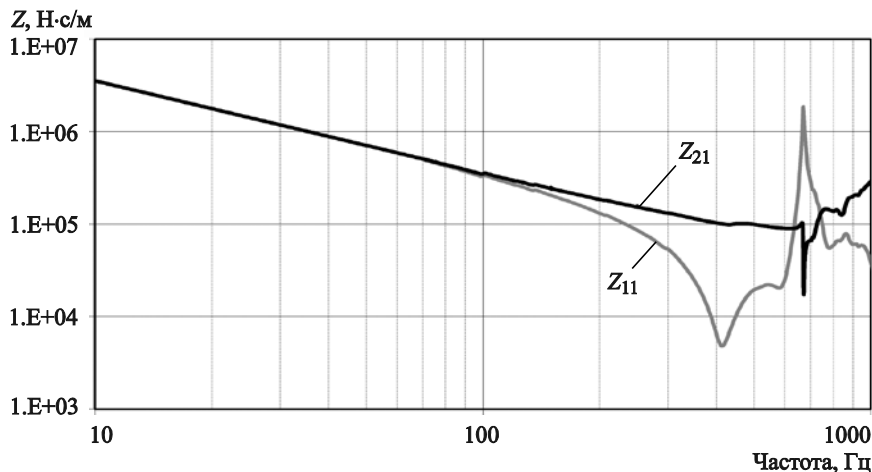


Рис. 5. Измеренные модули входного Z_{11} и передаточного Z_{21} сопротивлений тонкослойного резино-металлического элемента в осевом направлении

Fig. 5. Measured moduli of input Z_{11} and transfer Z_{21} resistances of thin rubber-metal element in axial direction

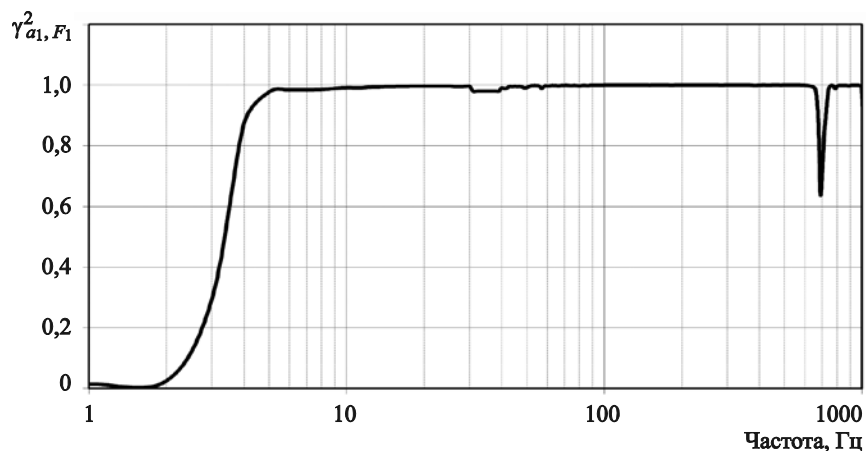


Рис. 6. Функция когерентности между сигналами с датчика ускорения на входе (a_1) и датчика силы на входе (F_1), осевое направление

Fig. 6. Coherence function between signals from input acceleration sensor (a_1) and input force sensor (F_1), axial direction

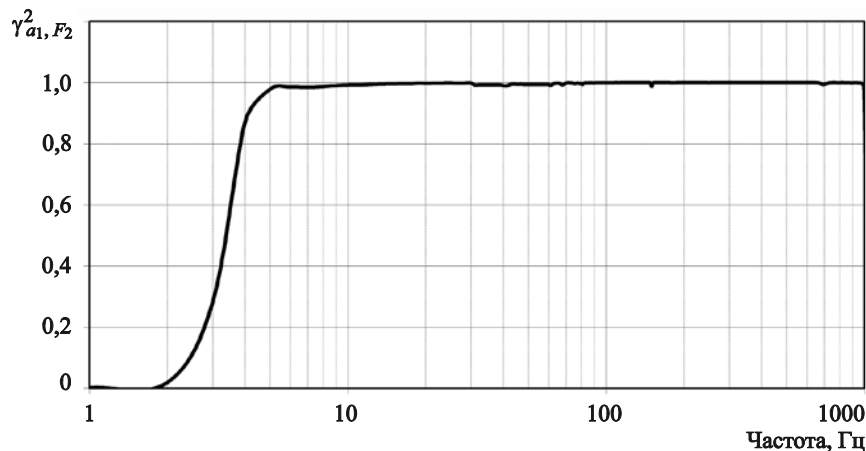
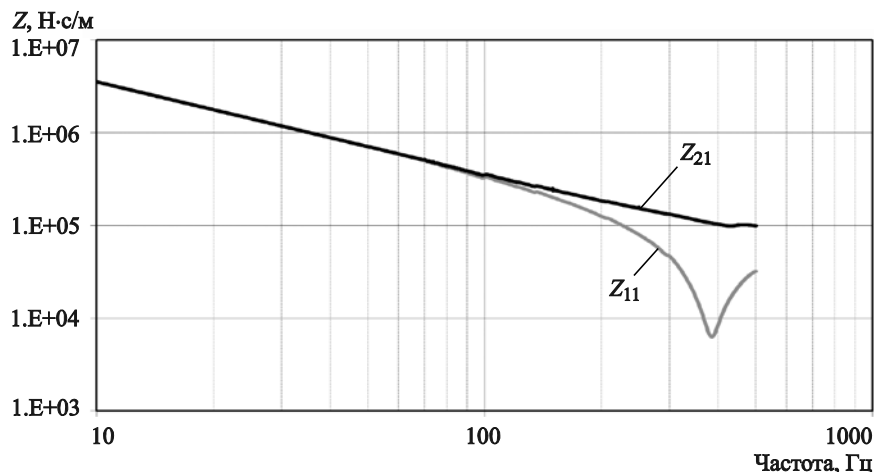


Рис. 7. Функция когерентности между сигналами с датчика ускорения на входе (a_1) и датчика силы на выходе (F_2), осевое направление

Fig. 7. Coherence function between the signals from input acceleration sensor (a_1) and output force sensor, axial direction

Рис. 8. Модули входного (Z_{11}) и передаточного (Z_{21}) механических сопротивлений ТРМЭ.0004-000 в осевом направлении

Fig. 8. Modules of input (Z_{11}) and transfer (Z_{21}) mechanical resistances TRME.0004-000 in axial direction



На рис. 5 приведены измеренные модули входного и передаточного сопротивлений ТРМЭ в осевом направлении.

При обработке результатов измерений механических сопротивлений необходимо ограничить частотный диапазон собственными частотами оснастки, а также учесть механическое сопротивление оснастки для входного сопротивления.

В частотном диапазоне, где оснастка представляет собой твердое тело, входное сопротивление испытуемой конструкции определяется по формуле

$$\bar{Z}_{11}(\omega) = \bar{Z}_{11}^{\text{изм}}(\omega) - j\omega m_{\text{осн}}, \quad (3)$$

где $\bar{Z}_{11}^{\text{изм}}(\omega)$ – измеренное входное сопротивление в комплексном виде испытуемой конструкции, Н·с/м; $m_{\text{осн}}$ – масса оснастки, кг.

Измеренные механические сопротивления считаются достоверными в тех диапазонах частот, где значения функции когерентности между сигналами с датчика ускорения на входе (a_1) и датчика силы на входе (F_1) и функции когерентности между сигналами с датчика ускорения на входе (a_1) и датчика силы на выходе (F_2) не менее 0,8 ($\gamma^2 \geq 0,8$).

Частотные зависимости функций когерентности γ_{a_1, F_1}^2 и γ_{a_1, F_2}^2 приведены на рис. 6 и 7.

С учетом функции когерентности, а также расчета собственных частот колебаний оснастки достоверные частотные характеристики входного и передаточного механических сопротивлений ТРМЭ.004-000 в осевом направлении представлены на рис. 8.

Схема измерений механических сопротивлений ТРМЭ.004-000 в радиальном направлении представлена на рис. 9.

При измерении механических сопротивлений в радиальном направлении используют дифферен-

циальную схему испытаний (установка двух идентичных испытуемых изделий), позволяющую создать чисто сдвиговые колебания конструкции, исключить изгибные колебания. Для выполнения условий испытаний в соответствии с формулами (1) и (2)

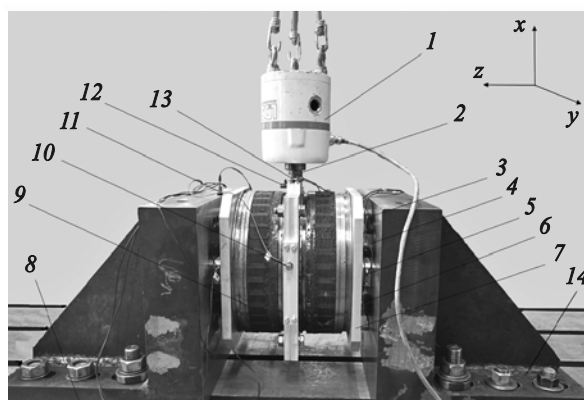


Рис. 9. Схема измерений механических сопротивлений ТРМЭ.0004-000 в радиальном направлении:

- 1 – вибратор; 2 – датчик силы на входе; 3–6 – датчики силы на выходе; 7 – оснастка; 8 – фундамент; 9 – тонкослойный резинометаллический элемент; 10 – датчик ускорения на входе в направлении оси y ; 11 – датчик ускорения на выходе; 12 – датчик ускорения на входе в направлении оси z ; 13 – датчик ускорения на входе в направлении оси x ; 14 – металлические опорные конструкции

Fig. 9. Mechanical resistance measurement setup of TRME.0004-000 in radial direction:

- 1 – vibrator; 2 – input force sensor; 3–6 – output force sensors; 7 – accessories; 8 – foundation; 9 – thin rubber-metal element; 10 – input acceleration sensor (Y axis); 11 – output acceleration sensor; 12 – input acceleration sensor (Z axis); 13 – input acceleration sensor (X axis); 14 – metal support structures

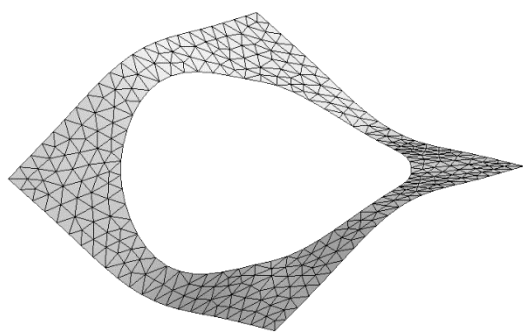


Рис. 10. Первая форма собственных колебаний оснастки с круглым вырезом в осевом направлении

Fig. 10. First natural vibration mode of accessories with round cutouts: axial direction

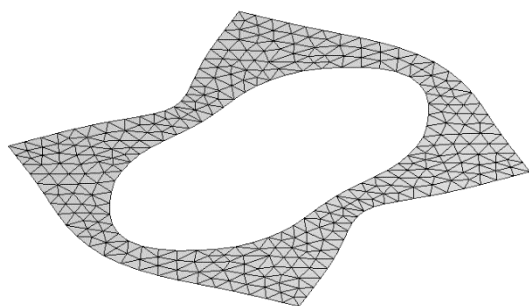


Рис. 11. Первая форма собственных колебаний оснастки с круглым вырезом в радиальном направлении (в плоскости пластины)

Fig. 11. First natural vibration mode of accessories with round cutouts: radial (in-plane) direction

использовались металлические опорные конструкции в виде жестких массивных уголков (позиция 14 на рис. 9), позволяющие создать условия заторможенности ($a_2 = 0$) испытуемых конструкций.

В качестве оснастки применялись пластины, которые позволили осуществить крепление ТРМЭ к массивным уголкам (позиция 7 на рис. 9) через трехкомпонентные датчики силы (позиции 3–6 на рис. 9) и соединить два ТРМЭ между собой (позиция 9 на рис. 9). Контроль однонаправленности колебаний осуществлялся с помощью акселерометров (позиции 10–13 на рис. 9). Для определения сопротивлений в радиальном направлении использовалась оснастка в виде квадратной пластины с круглым вырезом в центре на входе (рис. 10).

Расчет собственных частот оснастки показал, что низшая собственная частота этой оснастки составляет 1769 Гц (рис. 10). Следует отметить, что эта частота соответствует форме собственных колебаний оснастки в осевом направлении. Первая собственная частота колебаний в радиальном направлении составляет 3944 Гц (рис. 11). Полученные результаты показывают, что до частот около 1700 Гц оснастка ведет себя как твердое тело и использование формулы (3) для определения входного сопротивления в исследуемом диапазоне частот (до 1000 Гц) корректно.

Функции когерентности $\gamma^2_{a_1, F_1}$ и $\gamma^2_{a_1, F_2}$ приведены на рис. 12 и 13.

С учетом функции когерентности достоверные частотные характеристики входного и передаточного механических сопротивлений ТРМЭ.004-000 в радиальном направлении представлены на рис. 14. При обработке результата измерений входного сопротивления в радиальном направлении также учитывалось сопротивление оснастки в соответствии с формулой (3).

Результаты измерений механических сопротивлений позволяют определить частотно-зависимые динамические жесткости C , Н/м, в соответствии с формулой

$$C(\omega) = \omega \cdot Z_{21}(\omega). \quad (4)$$

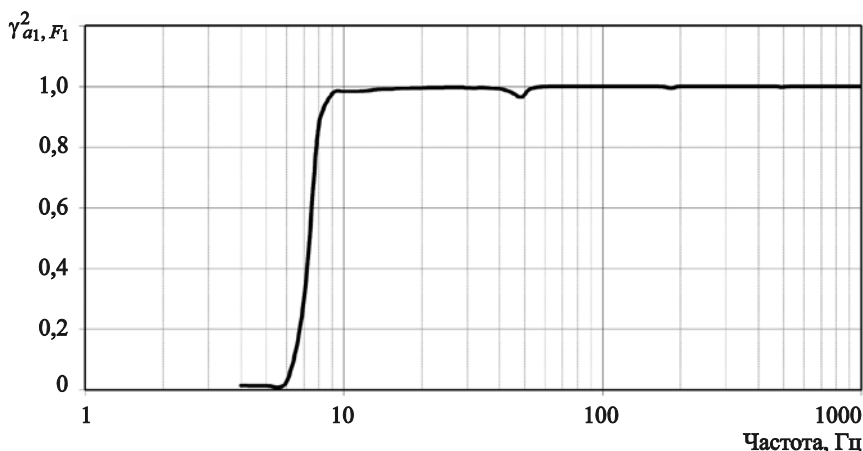


Рис. 12. Функция когерентности между сигналами с датчика ускорения на входе (a_1) и датчика силы на входе (F_1), радиальное направление

Fig. 12. Coherence function between the signals from input acceleration sensor (a_1) and input force sensor (F_1), radial direction

На рис. 15 представлены частотно-зависимые динамические жесткости ТРМЭ.004-000 в осевом и радиальном направлениях.

Из графика видно, что в области низких частот (до 100 Гц) динамическая жесткость в радиальном направлении ТРМЭ.004-000 значительно меньше

(на два порядка) осевой динамической жесткости. В диапазоне частот около 200 Гц и выше динамические жесткости в осевом и радиальном направлениях отличаются на порядок. Динамическая жесткость ТРМЭ.004-000 в осевом направлении практически не меняется в исследуемом частотном диа-

Рис. 13. Функция когерентности между сигналами с датчика ускорения на входе (a_1) и датчика силы на выходе (F_2), радиальное направление

Fig. 13. Coherence function between signals from input acceleration sensor (a_1) and output force sensor (F_2), radial direction

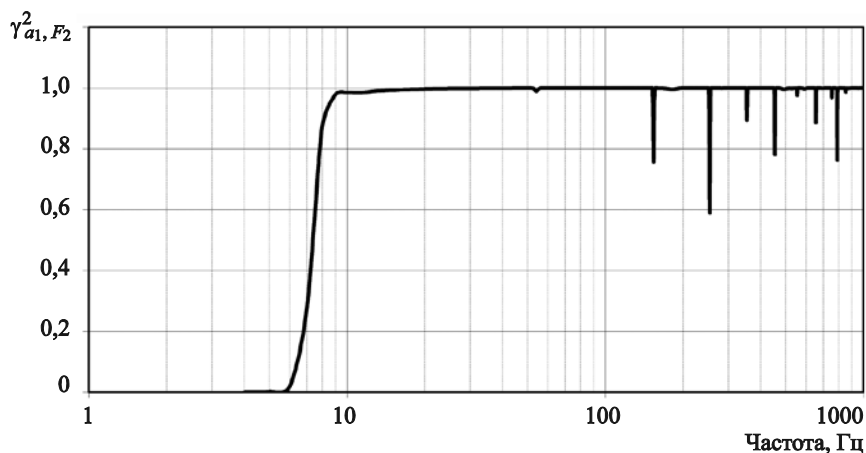


Рис. 14. Модули входного (Z_{11}) и передаточного (Z_{21}) механических сопротивлений ТРМЭ.0004-000 в радиальном направлении

Fig. 14. Moduli of input (Z_{11}) and transfer (Z_{21}) mechanical resistances of TRME.0004-000 in radial direction

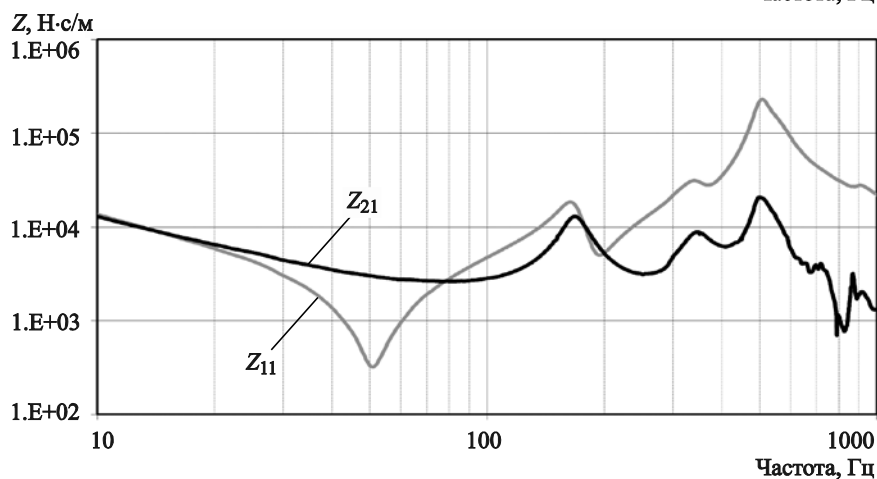
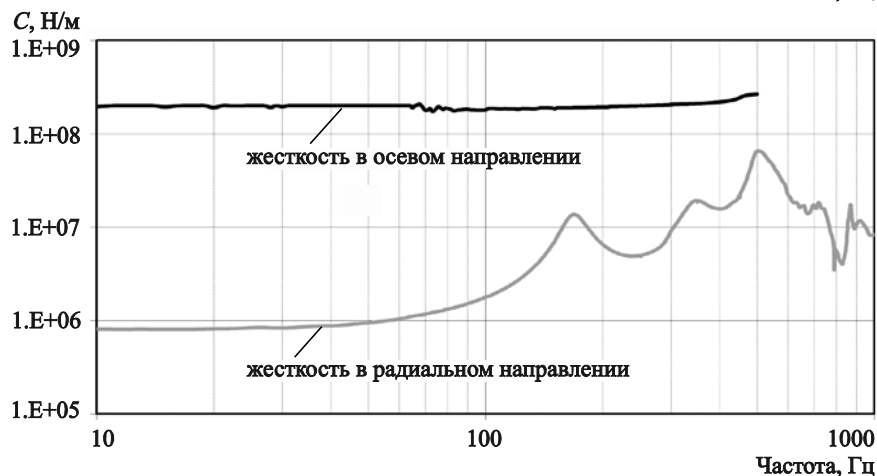


Рис. 15. Динамические жесткости ТРМЭ.004-000 в осевом и радиальном направлениях

Fig. 15. Dynamic stiffnesses of TRME.004-000 in axial and radial directions



пазоне. Динамическая жесткость в радиальном направлении ТРМЭ.004-000 значительно возрастает на частотах выше 100 Гц.

При измерении механических сопротивлений можно также получить информацию о коэффициенте потерь η испытываемой конструкции. Коэффициент потерь определяется по ширине резонансной характеристики входного сопротивления в осевом и радиальном направлениях. Для ТРМЭ.004-000 коэффициент потерь $\eta = 0,1$.

Заключение

Conclusion

Полученные данные о спектральных динамических характеристиках в осевом и поперечном направлениях элемента ТРМЭ позволят выполнить расчеты динамических сил, колебательных мощностей и эффективностей амортизирующих креплений, включающих тонкослойные резинометаллические элементы, в широком частотном диапазоне.

Список использованной литературы

1. Попков В.И., Попков С.В. Колебания механизмов и конструкций. Санкт-Петербург : Сударыня, 2009. 490 с.
2. ИМЯН.360030.348.1. Альбом механических сопротивлений резинотехнических изделий / ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. Санкт-Петербург, 2000. 281 с.
3. РД ИМЯН.102-2005. Комплексные механические сопротивления амортизаторов: методика выполнения измерений / ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. Санкт-Петербург, 2005. 33 с.

References

1. Popkov V.I., Popkov S.V. Vibrations of mechanisms and structures. St. Petersburg : Sudarynya Publishing House, 2009. 490 p. (in Russian).
2. IMYAN.360030.348.1. Album of mechanical resistances for rubber products / Krylov Central Research Institute. St. Petersburg, 2000. 281 p. (in Russian).
3. RD IMYAN.102-2005. Complex mechanical resistances of shock absorbers: measurement methodology / Krylov Central Research Institute. / St. Petersburg, 2005. 33 p. (in Russian).

Сведения об авторах

Безъязычный Виктор Викторович, начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-47-65. E-mail: m_shabak-spaskaya@ksrc.ru.

Воинова Ольга Николаевна, начальник стенда ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-47-24. E-mail: voinova.cnii.krylova@gmail.com.

Кузнецов Николай Анастасович, начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 748-63-12. E-mail: naksnae@yandex.ru.

Кулижников Дмитрий Борисович, инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 748-63-12. E-mail: dima.kulizhnikov@mail.ru.

Попков Сергей Владимирович, д.т.н., профессор, заместитель начальника отделения – начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-45-72. E-mail: popkov.sv@gmail.com.

Щетинин Дмитрий Викторович, инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-47-24. E-mail: dmitrij.shhetinin@list.ru.

About the authors

Viktor V. Bezyazychny, Head of Sector, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-47-65. E-mail: m_shabak-spaskaya@ksrc.ru.

Olga N. Voinova, Test Rig Manager, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-47-24. E-mail: voinova.cnii.krylova@gmail.com.

Nikolay A. Kuznetsov, Head of Sector, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 748-63-12. E-mail: naksnae@yandex.ru.

Dmitry B. Kulizhnikov, Engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 748-63-12. E-mail: dima.kulizhnikov@mail.ru.

Sergey V. Popkov, D. Sci. (Eng.), Deputy Head of Division – Head of Laboratory, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-45-72. E-mail: popkov.sv@gmail.com.

Dmitry V. Shchetinin, Engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-47-24. E-mail: dmitrij.shhetinin@list.ru.

Поступила / Received: 26.03.24
Принята в печать / Accepted: 21.08.24
© Коллектив авторов, 2024