

УДК 534.647
DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4583
Шифр специальности ВАК: 2.5.2

Твердотельный демпфер для снижения виброактивности электромеханического устройства системы жизнеобеспечения нефтегазовых станций

А.Н. Гаврилин, В.С. Дмитриев, Д.В. Ермаков[✉], Д.А. Дерусова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]dvermakov@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Механические колебания – распространенный и технически важный процесс, который оказывает негативное акустическое влияние на здоровье человека и является вредным производственным фактором. В приборах и устройствах наличие вибрации обусловлено возбуждающими воздействиями различной физической природы: механической, электромагнитной, аэродинамической. Причиной их возникновения являются дефекты деталей и узлов, технический принцип устройства шарикоподшипников, а также совпадение рабочей частоты устройства с собственной частотой элементов конструкции. Поскольку полностью устранить виброактивность электромеханического устройства технически невозможно, актуальной задачей научных исследований становится в том числе и разработка демпфирующего устройства с определением его эффективности снижать виброактивность электромеханического устройства, тем самым минимизируя воздействия сопутствующих вредных производственных факторов на человека. Для решения этой задачи разработана 3Д-модель конструкции твердотельного демпфера на основе пеноалюминия по которой изготовлены два макета, различающиеся глубиной цилиндрических проточек, используемых для установки винтов. Из результатов измерения вибрационных характеристик следует, что материал, используемый в качестве гасителя колебаний, обладает демпфирующими свойствами и может быть применен для снижения уровня виброактивности электромеханического устройства. Сравнение результатов испытаний макетов твердотельного демпфера показало, что использование макета № 1 позволяет снизить амплитуду вибрации до 3 раз по сравнению с макетом № 2. **Объектом** исследования является фрагмент демпфирующего элемента – гасителя колебаний твердотельного демпфера – на основе пеноалюминия. **Цель:** разработать конструкцию макета твердотельного демпфера на основе пеноалюминия и определить эффективность его применения для снижения уровня виброактивности электромеханического устройства системы жизнеобеспечения нефтегазовых станций. **Методы:** современные подходы вибродиагностики, вычислительной математики и средств измерений. **Результаты** исследования показали возможность создания твердотельного демпфера на основе пеноалюминия для решения задач снижения амплитуды вибрации в диапазоне рабочих частот вращения ротора электромеханического устройства по сравнению с соответствующими вибрационными характеристиками без элементов демпфирования.

Ключевые слова: нефтегазовые станции, пеноалюминий, виброактивность, вибродиагностический комплекс, твердотельный демпфер

Благодарности: Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 23-79-10107 (лабораторное оборудование, результаты исследования демпфирующих свойств материалов).

Для цитирования: Твердотельный демпфер для снижения виброактивности электромеханического устройства системы жизнеобеспечения нефтегазовых станций / А.Н. Гаврилин, В.С. Дмитриев, Д.В. Ермаков, Д.А. Дерусова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 108–117. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4583

UDC 534.647

DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4583

Solid-state damper for reducing vibration activity of an electromechanical device of a life support system of oil and gas stations

A.N. Gavrilin, V.S. Dmitriev, D.V. Ermakov[✉], D.A. Derusova

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉]dvermakov@tpu.ru

Abstract. Relevance. Mechanical vibrations are a common and technically important process that has a negative acoustic effect on human health and in some cases is a harmful production factor. In devices, the presence of vibration is caused by exciting influences of various physical nature: mechanical, electromagnetic, aerodynamic. The reason for their occurrence are defects in parts and assemblies, the technical principle of the ball bearing device, as well as the coincidence of the operating frequency of the device with natural frequency of the structural elements. Since it is technically impossible to completely eliminate the vibration activity of an electromechanical device, the actual topic of scientific research is the technical task of developing a damping device with determining its effectiveness to reduce the vibration activity of an electromechanical device, thereby minimizing the effects of concomitant harmful production factors on humans. To study this problem, a 3D model of the construction of a solid-state damper based on aluminum foam has been developed, according to which two layouts are made with different depths of cylindrical ducts used to install screws. The results of measuring vibration characteristics showed that the material used as a vibration dampener has damping properties and can be used to reduce the level of vibration activity of an electromechanical device. A comparison of the test results of the solid-state damper layouts showed that using layout No. 1 reduces the vibration amplitude up to three times compared with layout No. 2. **Object.** Fragment of the damping element of the vibration damper of a solid-state damper based on aluminum foam. **Aim.** To develop a design for a solid-state damper based on aluminum foam and determine the effectiveness of its use to reduce the level of vibration activity of an electromechanical device of the life support system of oil and gas stations. **Methods.** Modern approaches of vibration diagnostics, computational mathematics and measuring instruments. **Results.** There is a possibility of creating a solid-state damper based on aluminum foam to solve the problems of reducing the amplitude of vibration in the operating frequency range of the rotor of an electromechanical device compared with the corresponding vibration characteristics without damping elements.

Keywords: oil and gas stations, aluminum foam, vibration activity, vibration diagnostic complex, solid-state damper

Acknowledgements: This study was supported by the Russian Science Foundation grant number 23-79-10107 (laboratory equipment, the results of experimental and theoretical studying on damping characteristics of materials).

For citation: Gavrilin A.N., Dmitriev V.S., Ermakov D.V., Derusova D.A. Solid-state damper for reducing vibration activity of the electromechanical device of the life support system of oil and gas stations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 108–117. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4583

Введение

Снижение уровня вибраций производственных объектов и сопутствующих шумов является важной научно-технической проблемой в области технической акустики. Шум механизмов возникает вследствие упругих колебаний как механизмов в целом, так и отдельных элементов конструкции электромеханических устройств (ЭМУ), их деталей.

ЭМУ – это большой класс исполнительных механизмов, в которых движителем является электрический двигатель любого типа с установленным на валу функциональным блоком, определяющим назначение ЭМУ.

Это очень широкая группа устройств от примитивного точила или дрели до прецизионных ЭМУ,

устанавливаемых на космических аппаратах. Общим функциональным признаком этой группы является наличие электродвигателя, определяющего динамические качества всего ЭМУ.

Системы жизнеобеспечения нефтегазовых станций, такие как вентиляция и кондиционирование, содержат ЭМУ – вентиляторы, работа которых сопровождается производственным шумом. Это оказывает негативное влияние на износ оборудования, уменьшение срока его эксплуатации, а также на здоровье операторов, находящихся в помещении, так как наличие производственного шума является вредным производственным фактором.

Полностью устранить виброактивность ЭМУ технически не представляется возможным. Ее

можно только уменьшить до приемлемого уровня работы значений.

Для снижения виброактивности механизма применяются как теоретические способы расчета конструкции ЭМУ, так и практические решения по гашению вибраций. Оценка виброактивности ЭМУ [1–6] показывает, что источники колебаний имеют различную физическую природу: дисбалансы, электромагнитные явления в электродвигателе, погрешность шарикоподшипников, технологические погрешности деталей конструкции, качество сборки.

Как следует из результатов исследований [2, 3], вибрация ЭМУ имеет плотный спектр частот от десятков до десятков тысяч герц, содержащий множество гармоник вибрационных возмущений. В связи с этим следует использовать основные способы снижения виброактивности ЭМУ – вентиляторы:

1. Уменьшить виброактивность самой конструкции ЭМУ на этапе разработки:
 - увеличить число лопаток рабочего колеса, поскольку с уменьшением числа лопаток увеличивается беспорядочность движения отдельных струй, вытекающих из межлопаточных промежутков, влияющих на общий уровень шума, создаваемого рабочим колесом.
 - изменить диапазон собственных частот элементов конструкции и частот возмущающих воздействий;
 - снизить дисбаланс роторной системы;
 - заменить подшипники качения подшипниками скольжения.
2. Ограничить угловую скорость электродвигателя ЭМУ, но данный способ не является универсальным и не дает возможности использовать весь технический потенциал устройства.
3. Разработать виброзащиту, установив ее непосредственно в источник виброактивности.

Увеличение жесткости и веса конструкции в ряде случаев практически не влияет на аэродинамическое шумообразование. Поэтому очень часто увеличение жесткости и веса колеса и кожуха приводят к излишнему увеличению веса конструкции ЭМУ и ее стоимости, не влияя на акустические свойства.

Одним из новых направлений в области разработки демпферов является использование пенометаллов ввиду сочетания их низкой плотности, высокой удельной жесткости и прочности, а также способности поглощения энергии [7–10]. В частности, в работе [7] было показано, что пенометаллы могут превосходно поглощать и рассеивать энергию за счет деформации, что делает их идеальными материалами для поглощения ударов и ослабления вибрации. Причем оптимизация температуры, рабочего диапазона и амплитуды прикладываемых

напряжений позволяет регулировать демпфирующие способности пенометаллов. Также важно отметить, что демпфирующие свойства пористых металлов проявляются при пластических деформациях и уплотнении, а возникающие при этом напряжения меньше предела текучести «сплошных» металлов [11–24]. Особенность гистерезиса пористых материалов [11–24] заключается в наличии области, ограничивающей амплитуду силового возмущающего воздействия, передаваемого на пористый материал. Наличие пор в алюминии также вызывает существенное затухание вибраций из-за преобразования резонансных мод колеблющегося объекта. Отмеченные преимущества пенометаллов объясняют целесообразность их использования при создании демпферов для снижения виброактивности ЭМУ в различных практических применениях.

Настоящая работа посвящена созданию конструкции макета твердотельного демпфера на основе пеноалюминия и исследованию эффективности его применения для снижения уровня виброактивности ЭМУ системы жизнеобеспечения нефтегазовых станций. С этой целью проведены экспериментальные исследования на примере анализа вибраций, возникающих в процессе функционирования ЭМУ.

Конструкция твердотельного демпфера

Основу конструкции разработанного твердотельного демпфера составляет пористый пеноалюминий размерами 100×100×40 мм (рис. 1). Пеноалюминий получен из сплава Д16 ГОСТ4784-97, что и определяет его основные механические свойства. Анализ технологии изготовления исследуемого образца пеноалюминия выходит за рамки данной исследовательской работы, но представлен в работах [17–19].

С использованием демпфирующего элемента, приведенного на рис. 1, спроектирован макет твердотельного демпфера (рис. 2, а).



Рис. 1. Фрагмент твердотельного демпфера на основе пеноалюминия

Fig. 1. Fragment of a solid-state damper based on aluminum foam

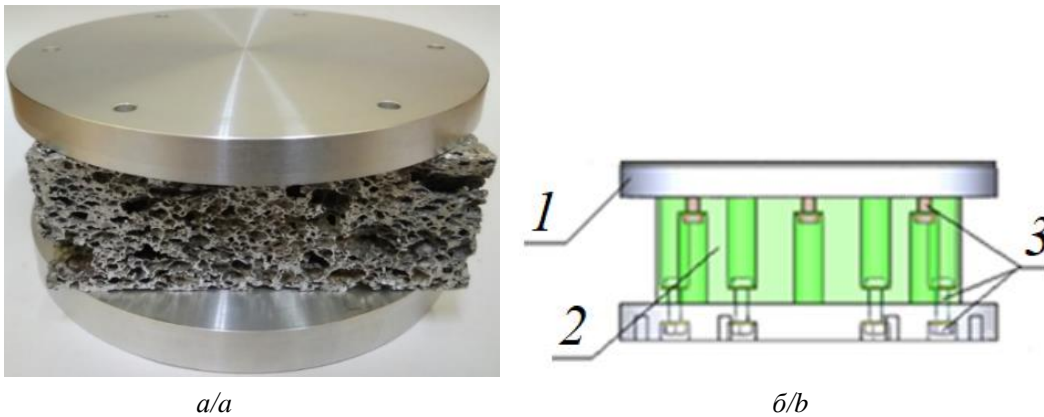


Рис. 2. Макет твердотельного демпфера (а), 3D-модель макета (б), 1 – основание крепления ЭМУ, 2 – фрагмент гасителя колебаний на основе пеноалюминия, 3 – крепежные детали макета
Fig. 2. Layout of a solid-state damper (a), 3D model of the layout (b), 1 – Electromechanical device mounting base, 2 – fragment of an oscillator based on aluminum foam, 3 – fasteners of the layout

Таблица 1. Конструкции макетов твердотельного демпфера на основе пеноалюминия

Table 1. Designs of solid-state damper layouts based on aluminum foam

№ макета Layout number	Конструкция макета Layout design	Глубина цилиндрических проточек, мм Depth of the cylindrical ducts, mm
1	<p>площадка крепления ЭМУ пеноалюминий</p>	26
2	<p>площадка крепления ЭМУ пеноалюминий</p>	7

Макет твердотельного демпфера (рис. 2, а) содержит основание для крепления ЭМУ и основание для крепления твердотельного демпфера с установленным на нем ЭМУ на виброизмерительном стенде (рис. 2, б). Крепление пеноалюминия к посадочной площадке ЭМУ и основанию осуществляется таким образом, чтобы обеспечить кинематическую развязку между техническим устройством и плоскостью его установки через фрагмент демпфирующего элемента гасителя колебаний твердотельного демпфера. Причем в исследовательских целях применены два фрагмента с разной глубиной проточек для установки винтов 7 и 26 мм (табл. 1) для обеспечения различного сопротивления деформации материала пеноалюминия под воздействием вибрационных сил.

Оборудование для проведения исследования эффективности применения твердотельного демпфера

Определение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) твердотельного демпфера проводилось в соответствии с ГОСТ 30630.1.1-99. Макеты подверглись воздействию синусоидальной вибрации с плавной разверткой частоты в диапазоне частот 10–2000 Гц при значении амплитуды ускорения в контрольной точке $4,9 \text{ м/с}^2$ и скорости изменения частоты 1 окт./мин.

Общая схема испытаний состоит из вибрационной системы (вибратора), усилителя мощности, системы управления виброиспытаниями, а также виброизмерительных преобразователей (ВИП).

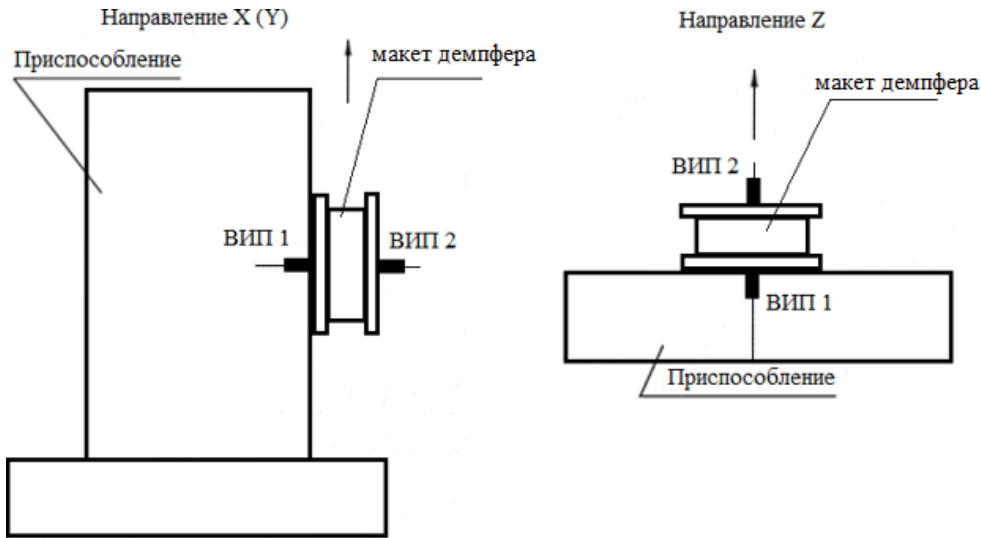


Рис. 3. Схема расположения ВИП на макетах твердотельного демпфера
Fig. 3. Layout of the vibration measuring transducer on the layouts of the solid-state damper

Для закрепления макетов на платформе вибрационной системы использовались специально разработанные приспособления (рис. 3), не имеющие собственных резонансных частот в диапазоне до 2000 Гц. Данное требование, предъявляемое к приспособлениям механических испытаний, позволяет исключить их собственные частоты колебаний из диапазона рабочих частот твердотельного демпфера.

Определение АЧХ макетов осуществлялось поочередно в каждом из трех взаимно перпендикулярных направлениях (X, Y, Z) декартовой системы координат. Причем направления X и Y находятся в плоскости исследуемого объекта. ВИП устанавливались на макеты демпферов (рис. 3), рабочие оси которых ориентируются по направлению генерируемых стендом колебаний.

После определения АЧХ проведены виброиспытания твердотельных демпферов с помощью портативного вибродиагностического комплекса К-5101

[2], предназначенного для исследования и сбора данных, в том числе с отметками времени, при измерении общего уровня вибрации, базового и расширенного анализа динамических характеристик элементов конструкции. Блок-схема стенда и вибродиагностического комплекса для измерения вибрационных характеристик ЭМУ, а также методика определения эффективности снижения виброактивности подробно описаны в работе [2].

Результаты эффективности применения твердотельного демпфера

Проведенные исследования по определению АЧХ твердотельного демпфера на вибрационном стенде позволили сопоставить резонансные частоты разработанных макетов демпферов с диапазоном рабочих частот вращения ротора ЭМУ. Результаты исследований приведены на рис. 4, 5 и в табл. 2.

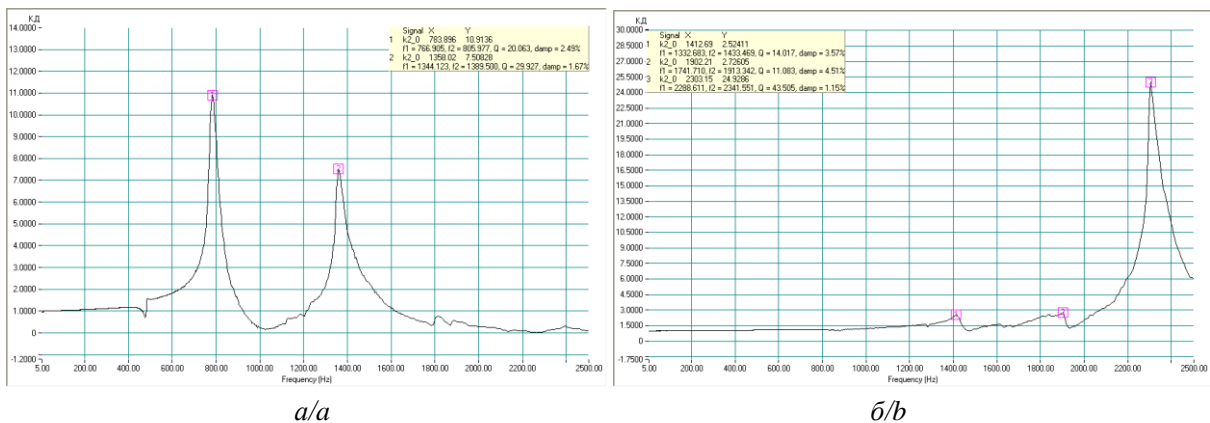


Рис. 4. АЧХ макета № 1 (а) по направлению X(Y), (б) по направлению Z
Fig. 4. Frequency response of layout no. 1 (a) in the X(Y) direction, (b) in the Z direction

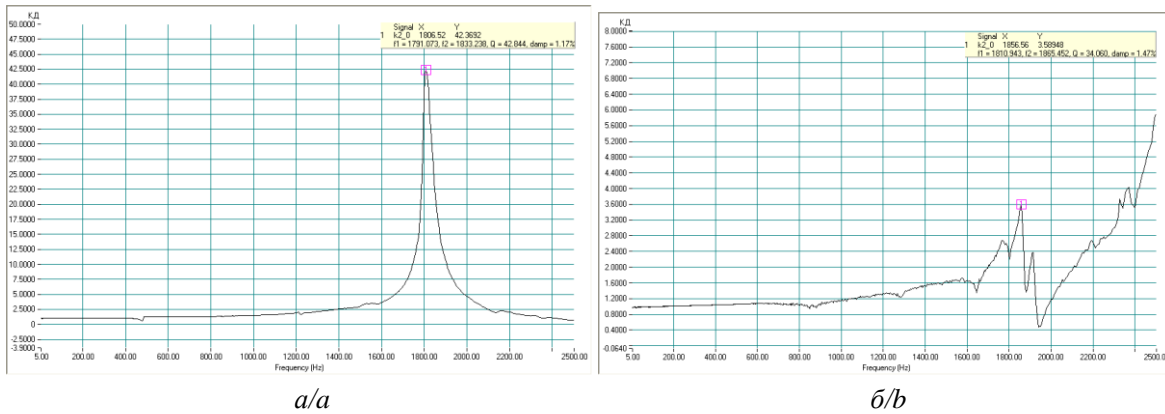


Рис. 5. АЧХ макета № 2 (а) по направлению X(Y), (б) по направлению Z
Fig. 5. Frequency response of layout no. 2 (a) in the X(Y) direction, (b) in the Z direction

Таблица 2. АЧХ макетов твердотельных демпферов в диапазоне частот от 5 Гц до 2,5 кГц

Table 2. Frequency response of models of solid-state dampers in the frequency range from 5 Hz to 2.5 kHz

Наименование параметра Parameter name	№ макета Layout number	
	1	2
Направление X (Y)/X (Y) direction		
Первая резонансная частота, Гц The first resonant frequency, Hz	783,9	1806,5
Коэффициент передачи/Transmission ratio	20,06	42,84
Коэффициент демпфирования Damping coefficient, %	2,49	1,17
Направление Z/Z direction		
Первая резонансная частота, Гц The first resonant frequency, Hz	1412,7	1856,6
Коэффициент передачи/Transmission ratio	14,02	34,06
Коэффициент демпфирования Damping coefficient, %	3,57	1,47

и, как следствие, разным сопротивлением деформации фрагмента гасителя колебаний под приложенной нагрузкой.

Сравнительный анализ по коэффициенту эффективности [2] показал наибольшую эффективность снижения виброактивности ЭМУ для макета № 1, глубина проточек которого значительно меньше, чем в макете № 2 (табл. 3) (рис. 6, 7). Это можно объяснить тем, что помимо механизмов, связанных с внутренним изменением микро- или макроструктур твердотельных материалов, а именно дислокаций, локальных дефектов кристаллических решеток, релаксаций напряжений на границах зерен, фазовых процессов и т. д., которые влияют на эффективность рассеивания энергии, необходимо учитывать и жесткость пеноалюминия. Конструкция макета № 2 имеет больше механизмов рассеивания энергии, чем макет № 1, под воздействием внешней нагрузки, поскольку глубина проточек меньше, но он также обладает и большим потенциалом сопротивления деформации, что подтвердили исследования вибрационных характеристик (табл. 2), а значит, и диссипация энергии в нем меньше.

Из полученных вибрационных характеристик твердотельных демпферов (табл. 2) следует, что резонансные частоты разработанных макетов не входят в рабочий диапазон вращения ротора ЭМУ (1,666÷50 Гц). Причем макет № 1 имеет значительно меньшую жесткость, чем макет № 2. Это можно объяснить различием глубины проточек под винты

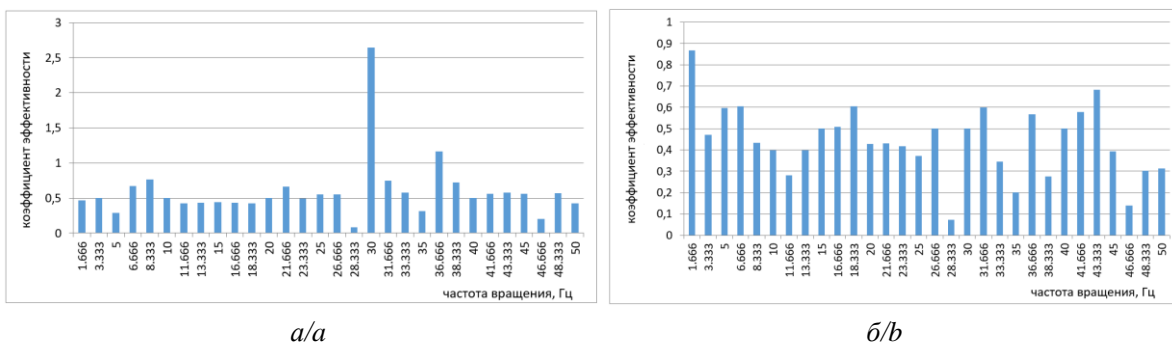
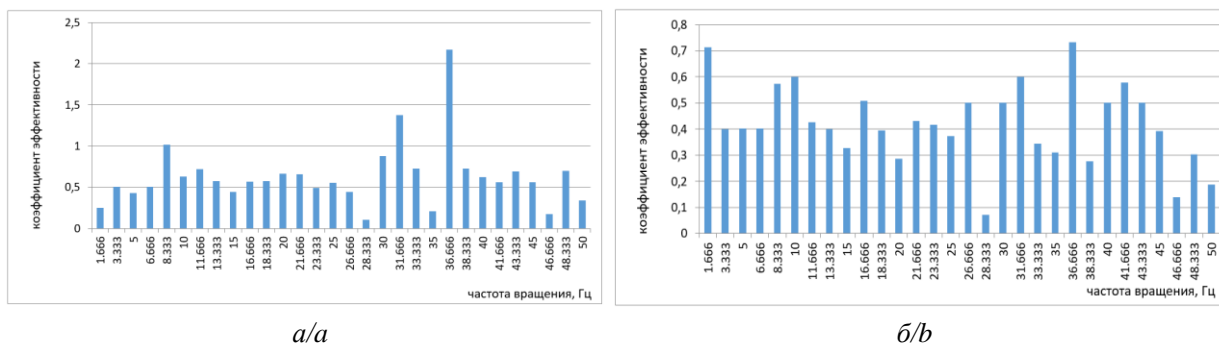


Рис. 6. Изменение коэффициента эффективности от частоты вращения ротора ЭМУ с макетом № 1 (а) по направлению X (Y), (б) по направлению Z
Fig. 6. Change in the efficiency coefficient depending on the rotation frequency of the EMU rotor with layout no. 1 (a) in the X (Y) direction, (b) in the Z direction



a/a

b/b

Рис. 7. Изменение коэффициента эффективности от частоты вращения ротора ЭМУ с макетом № 2 (a) по направлению X (Y), (б) по направлению Z

Fig. 7. Change in the efficiency coefficient depending on the rotation frequency of the EMU rotor with layout no. 2 (a) in the X (Y) direction, (b) in the Z direction

Таблица 3. Результаты испытаний макетов твердотельного демпфера

Table 3. Test results of solid-state damper layouts

Вариант применения макета Variants of the layout application	Амплитуда виброперемещения по осям (мм) Amplitude of vibration displacement along the axes (mm)		Диапазон частот вращения ротора, Гц (об/мин) Rotor speed range, Hz (rpm)
	X(Y)	Z	
ЭМУ без демпфера EMU without damper	0,479	0,287	1,66÷50 (100÷3000)
Макет № 1 Layout no. 1	0,121	0,119	
Макет № 2 Layout no. 2	0,224	0,145	

Результаты измерения вибрационных характеристик ЭМУ (табл. 3) с разработанными макетами твердотельного демпфера на основе пеноалюминия показали, что используемый материал обладает неплохими демпфирующими свойствами и может быть применен для снижения уровня вибрации с учетом его сопротивления деформационной нагрузке при—виброактивности ЭМУ. Амплитудные значения виброперемещения при использовании макета твердотельного демпфера снизились в 3 раза.

Заключение

Из приведенных в статье результатов исследований следует, что виброактивность ЭМУ представляет собой плотный спектр частот от десятков до десятков тысяч герц, который содержит множество гармоник вибрационных возмущений, возникающих в конструкции электрического двигателя, являющегося генератором указанных вибраций. С целью решения технических проблем снижения виброактивности ЭМУ системы жизнеобеспечения нефтегазовых станций предложена конструкция твердотельного демпфера, а проведенные исследования двух макетов показали, что материал пеноалюминий обладает демпфирующими свойствами для эффективной минимизации виброактивности ЭМУ.

Эффективность демпфирования вибраций за счет применения твердотельных демпферов оценивалась с использованием лабораторного электродинамического вибростенда ET-139 и вибродиагностического комплекса К-5101. Результаты проведения виброиспытаний показали, что использование предложенного технического решения на основе разработанной конструкции твердотельного демпфера позволяет минимизировать виброактивность ЭМУ до 3 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ermakov D., Dmitriev V. Solid state damper based on foam aluminum to reduce vibration activity of electromechanical devices // Recent Developments in the Field of Non-Destructive Testing, Safety and Materials Science. ICMTNT 2021. Studies in Systems, Decision and Control / Eds. E. Lysenko, A. Rogachev, O. Starý. – 2023. – Vol. 433. DOI: 10.1007/978-3-030-99060-2_8
- Снижение виброактивности вентилятора системы жизнеобеспечения нефтегазовых станций / А.Н. Гаврилин, В.С. Дмитриев, Д.В. Ермаков, Д.А. Дерусова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 11. – С. 128–137. DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4293
- Минимизация виброактивности малощумных вентиляторов / В.С. Дмитриев, Л.Я. Миньков, Т.Г. Костюченко, В.В. Дердиященко, Д.С. Панфилов, Д.В. Ермаков // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2022. – № 76. – С. 101–117. DOI: 10.17223/19988621/76/8
- Идентификация параметров механической системы на примере вибрационного электромеханического преобразователя энергии / А.С. Глазырин, В.В. Тимошкин, С.В. Цурпал, Т.А. Глазырина // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 4. – С. 174–177.
- Оптимизация порядка редуцированной динамической модели ненагруженного нефтепогружного кабеля на основе аппроксимации амплитудно-частотной характеристики / А.С. Глазырин, Ю.Н. Исаев, С.Н. Кладиев, А.П. Леонов,

- И.В. Раков, С.В. Колесников, С.В. Ланграф, А.А. Филипас, В.А. Копырин, Р.Н. Хамитов, В.З. Ковалев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 9 – С. 154–167. DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3365
6. Журавлев В.Ф., Бальмонт В.Б. Механика шарикоподшипников гироскопов / под ред. Д.М. Климова. – М.: Машиностроение, 1985. – 271 с.
 7. Madhu H.C., Satish V. Kailas exploring damping behavior of novel polymer-derived aluminum alloy foam // *Materials Letters*. – 2024. – Vol. 357. – Article number 135758.
 8. Local deformation on damping performance of integral-forming aluminum foam sandwich / N. Liu, Z. Zhang, X. Xia, T. Xu, Z. Wang, J. Ding, Y. Liu // *Materials Letters*. – 2022. – Vol. 323. – Article number 132545.
 9. Frequency dependence of the internal friction of the AMg6 alloy / A.K. Tomilin, F.Y. Kuznetsov, I.S. Konovalenko, V.A. Krasnoveikin, I.Y. Smolin // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2021. – Vol. 50 (3). – P. 243–250. DOI: 10.3103/S1052618821030158
 10. Tomilin A.K., Ziyakaev G.R. Natural vibrations of a spacecraft's solar array wing // *Cosmic Research*. – 2021. – Vol. 59 (1). – P. 53–58. DOI: 10.1134/S0010952521010081
 11. Lightweight open cell aluminum foam for superior mechanical and electromagnetic interference shielding properties / R. Kumar, H. Jain, S. Sriram, A. Chaudhary, A. Khare, V.A.N. Ch, D.P. Mondal // *Mater. Chem. Phys.* – 2020. – Vol. 40. – 122274. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2019.122274
 12. Research on dynamic accumulation effect and constitutive model of aluminum foams under dynamic impact / H. Gao, C. Xiong, J. Yin, H. Deng // *Int. Metalcas.* – 2019. – Vol. 13. – P. 146–157. DOI: 10.1007/s40962-018-0245-0
 13. Improving the surface of titanium alloys with wave cutters / G. Korovin, A. Gavrilin, S. Petrushin, G. Odnokopylov, D. Ermakov // *Recent Developments in the Field of Non-Destructive Testing, Safety and Materials Science ICMTNT 2021. Studies in Systems, Decision and Control* // Eds. E. Lysenko, A. Rogachev, O. Starý. – 2023. – Vol. 433. DOI: 10.1007/978-3-030-99060-2_7
 14. Stress-strain states and energy absorption in open-cell aluminium foams under hypervelocity impact / S. Zhao, X. Zhang, R. Wang, R. Li // *Composite Structures*. – 2023. – Vol. 313. – 116885. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.116885
 15. Energy-absorption analyses of grooved Al-sheet stacks using modified split Hopkinson pressure bar / S. Kim, H. Kang, M. Kim, K. Kim, J. Lee, H. Cheong, H. Kim, S. Lee // *Materials Science and Engineering: A*. – 2023. – Vol. 886. – 145721. DOI: 10.1016/j.msea.2023.145721
 16. Analyses of impact energy-absorbing performance of open- and closed-cell Al foams using modified split Hopkinson pressure bar / S. Kim, D. Kim, M. Kim, K. Kim, J. Lee, J. Lee, H. Cheong, H. Kim, S. Lee // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2023. – Vol. 965. – 171349. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.171349
 17. Бутарович Д.О., Смирнов А.А., Рябов Д.М. Пеноалюминий как энергопоглощающий материал и его механические свойства // *Известия высших учебных заведений. Сер. Машиностроение*. – 2011. – № 7. – С. 53–58.
 18. Aluminum foam production, properties, and applications: a review / N. Patel, G. Mittal, M. Agrawal et al. // *Inter Metalcast*. – 2023. DOI: 10.1007/s40962-023-01174-8
 19. Biaxial characterization of open-cell aluminum foams from macro to micro responses / S. Huluka, A. Abdul-Latif, R. Baleh, A. Larbi, I. Deiab, K. Khanafer // *Materials Science and Engineering: A*. – 2023. – Vol. 868. – 144588. DOI: 10.1016/j.msea.2023.144588
 20. Thorntor P.H., Magee C.L. The deformation of aluminium foams // *Met. Trans. A*. – 1975. – Vol. 6A. – № 6. – P. 1253–1263.
 21. Wei P., Liu L. Influence of density on compressive properties and energy absorption of foamed aluminium alloy // *J. of Wuhan Univ. of Techn. Mater. Sci.* – 2007. – Vol. 22 (2). – P. 225–228.
 22. Об основных особенностях механических и амортизирующих свойств высокопористых алюминиевых сплавов / В.А. Марков, А.Ф. Овчинников, В.И. Пусев, В.В. Селиванов // *Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XVI Международного симпозиума имени А.Г. Горшкова*. – Ярополец, 15–19 февраля 2010. – Чебоксары: ГУП «ИПК «Чувашия», 2010. – Т. 2. – С. 218–225.
 23. Механические и амортизирующие свойства высокопористого ячеистого алюминия / А.П. Гусаров, А.В. Жариков, В.А. Марков, А.Ф. Овчинников, В.И. Пусев, В.В. Селиванов, А.Н. Сообшиков // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. – 2009. – № 1 (74). – С. 58–66.
 24. Селиванов В.В. О механических свойствах высокопористых алюминиевых сплавов // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. – 2011. – № 4. – Ч. 4. – С. 1760–1762.

Информация об авторах

Алексей Николаевич Гаврилин, доктор технических наук, профессор отделения машиностроения Школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. gawral@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9205-2283>.

Виктор Степанович Дмитриев, доктор технических наук, профессор, экс-профессор Школы неразрушающего контроля и безопасности Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. dmitriev@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9108-9845>.

Дмитрий Владимирович Ермаков, кандидат технических наук, ассистент отделения машиностроения Школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. dvermakov@tpu.ru

Дарья Александровна Дерусова, доктор технических наук, старший научный сотрудник Центра промышленной томографии Школы неразрушающего контроля и безопасности Национального исследова-

тельского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. red@tpu.ru;
<https://orcid.org/0000-0003-2142-856X>.

Поступила в редакцию: 15.02.2024

Поступила после рецензирования: 29.02.2024

Принята к публикации: 22.03.2024

REFERENCES

1. Ermakov D., Dmitriev V. Solid state damper based on foam aluminum to reduce vibration activity of electromechanical devices. *Recent Developments in the Field of Non-Destructive Testing, Safety and Materials Science. ICMTNT 2021. Studies in Systems, Decision and Control*. Eds. E. Lysenko, A. Rogachev, O. Starý. 2023, vol. 433. DOI: 10.1007/978-3-030-99060-2_8
2. Gavrilin A.N., Dmitriev V.S., Ermakov D.V., Derusova D.A. Reduction of a fan vibration activity in a life support system of oil and gas stations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 11, pp. 128–137. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4293
3. Dmitriev V.S., Minkov L.Ya., Kostyuchenko T.G., Derdiyashchenko V.V., Panfilov D.S., Ermakov D.V. Minimization of vibration activity of low-noise fans. *Bulletin of Tomsk State University. Mathematics and mechanics*, 2022, no. 76, pp. 101–117. (In Russ.) DOI: 10.17223/19988621/76/8
4. Glazyrin A.S., Timoshkin V.V., Tsurpal S.V., Glazyrina T.A. Identification of parameters of a mechanical system by the example of a vibrating electromechanical energy converter. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 4, pp. 174–177. (In Russ.)
5. Glazyrin A.S., Isaev Yu.N., Kladijev S.N., Leonov A.P., Rakov I.V., Kolesnikov S.V., Langraf S.V., Filipas A.A., Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Kovalev V.Z. Optimization of the order of a reduced dynamic model of an unloaded oil-submersible cable based on the approximation of the amplitude-frequency response. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 154–167. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3365
6. Zhuravlev V.F., Balmont V.B. *Mechanics of ball bearings of gyroscopes*. Ed. by D.M. Klimov. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 271 p. (In Russ.)
7. Madhu H.C., Kailas S.V. Exploring damping behavior of novel polymer-derived aluminum alloy foam. *Materials Letters*, 2024, vol. 357, article number 135758.
8. Liu N., Zhang Z., Xia X., Xu T., Wang Z., Ding J., Liu Y. Local deformation on damping performance of integral-forming aluminum foam sandwich. *Materials Letters*, 2022, vol. 323, article number 132545.
9. Tomilin A.K., Kuznetsov F.Y., Konovalenko I.S., Krasnovalkin V.A., Smolin I.Y. Frequency dependence of the internal friction of the AMg6 alloy. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2021, vol. 50 (3), pp. 243–250. DOI: 10.3103/S1052618821030158
10. Tomilin A.K., Ziyakaev G.R. Natural vibrations of a spacecraft's solar array wing. *Cosmic Research*, 2021, vol. 59 (1), pp. 53–58. DOI: 10.1134/S0010952521010081
11. Kumar R., Jain H., Sriram S., Chaudhary A., Khare A., Ch V.A.N., Mondal D.P. Lightweight open cell aluminum foam for superior mechanical and electromagnetic interference shielding properties. *Mater. Chem. Phys.*, 2020, vol. 40, 122274. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2019.122274
12. Gao H., Xiong C., Yin J., Deng H. Research on dynamic accumulation effect and constitutive model of aluminum foams under dynamic impact. *Int. Metalcast.*, 2019, vol. 13, pp. 146–157. DOI: 10.1007/s40962-018-0245-0
13. Korovin G., Gavrilin A., Petrushin S., Odnokopylov G., Ermakov D. Improving the surface of titanium alloys with wave cutters. *Recent Developments in the Field of Non-Destructive Testing, Safety and Materials Science. ICMTNT 2021. Studies in Systems, Decision and Control*. Eds. E. Lysenko, A. Rogachev, O. Starý. Springer, Cham, 2023. Vol. 433. DOI: 10.1007/978-3-030-99060-2_7
14. Zhao S., Zhang X., Wang R., Li R. Stress-strain states and energy absorption in open-cell aluminium foams under hypervelocity impact. *Composite Structures*, 2023, vol. 313, 116885. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.116885
15. Kim S., Kang H., Kim M., Kim K., Lee J., Cheong H., Kim H., Lee S. Energy-absorption analyses of grooved Al-sheet stacks using modified split Hopkinson pressure bar. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, vol. 886, 145721. DOI: 10.1016/j.msea.2023.145721
16. Kim S., Kim D., Kim M., Kim K., Lee J., Lee J., Cheong H., Kim H., Lee S. Analyses of impact energy-absorbing performance of open- and closed-cell Al foams using modified split Hopkinson pressure bar. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, vol. 965, 171349. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.171349
17. Butarovich D.O., Smirnov A.A., Ryabov D.M., Aluminum foam as an energy-absorbing material and its mechanical properties. *Proceedings of higher educational institutions. Ser. Mechanical engineering*, 2011, no. 7, pp. 53–58. (In Russ.)
18. Patel N., Mittal G., Agrawal M. Aluminum foam production, properties, and applications: a review. *Inter Metalcast*, 2023. DOI: 10.1007/s40962-023-01174-8
19. Huluka S., Abdul-Latif A., Baleh R., Larbi A., Deiab I., Khanafer K. Biaxial characterization of open-cell aluminum foams from macro to micro responses. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, vol. 868, 144588. DOI: 10.1016/j.msea.2023.144588
20. Thorntor P.H., Magee C.L. The deformation of aluminium foams. *Met. Trans. A*, 1975, vol. 6A, no. 6, pp. 1253–1263.
21. Wei P., Liu L. Influence of density on compressive properties and energy absorption of foamed aluminium alloy. *J. of Wuhan Univ. of Techn. Mater. Sci.*, 2007, vol. 22, no. 2, pp. 225–228.
22. Markov V.A., Ovchinnikov A.F., Pusev V.I., Selivanov V.V. On the main features of the mechanical and shock-absorbing properties of highly porous aluminum alloys. *Proceedings of the XVI International Symposium named after A.G. Gorshkov*.

Dynamic and technological problems of mechanics of structures and continuous media. Yaropolets, February 15–19, 2010. Cheboksary, SUE IPK Chuvashia Publ., 2010. Vol. 2, pp. 218–225 (In Russ.)

23. Gusarov A.P., Zharikov A.V., Markov V.A., Ovchinnikov A.F., Pusev V.I., Selivanov V.V., Soobshikov A.N. Mechanical and shock-absorbing properties of highly porous cellular aluminum. *Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mashinostroenie*, 2009, no. 1 (74), pp. 58–66. (In Russ.)
24. Selivanov V.V. On the mechanical properties of highly porous aluminum alloys. *Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after N.I. Lobachevsky*, 2011, no. 4, P. 4, pp. 1760–1762. (In Russ.)

Information about the authors

Alexey N. Gavrilin, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. gawral@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9205-2283>.

Viktor S. Dmitriev, Dr. Sc., ex-Professor National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. dmitriev@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9108-9845>.

Dmitry V. Ermakov, Cand. Sc., Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. dvermakov@tpu.ru

Daria A. Derusova, Dr. Sc., Senior Researcher, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. red@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2142-856X>.

Received: 15.02.2024

Revised: 29.02.2024

Accepted: 22.03.2024