

ДВУХКАСКАДНАЯ СИСТЕМА ВИБРОИЗОЛЯЦИИ С ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМ КОМПЕНСАТОРОМ ВИБРОАКТИВНЫХ СИЛ

Ю. А. Бурьян¹, Д. В. Ситников¹, Б. А. Калашников¹,
Е. А. Воронов¹, С. А. Макеев²

¹Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

²Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет,
Россия, 644080, г. Омск, пр. Мира, 5

Рассмотрен принцип построения двухкаскадной активной системы виброизоляции, в которой на промежуточной раме установлен электродинамический компенсатор виброактивных сил, управление движением подвижной массы которого осуществляется по информации от датчика абсолютного перемещения промежуточной рамы. Принцип динамической инерционной компенсации усилия заключается в том, что при возвратно-поступательном движении массы подвижного узла компенсатора будет создаваться дополнительная инерционная сила, компенсирующая на заданной частоте виброактивную силу. Приведена принципиальная схема управления электродинамическим компенсатором, дана оценка устойчивости и показано, что применение электродинамического компенсатора уменьшает на 20–30 дБ передачу усилия на корпус и сдвигает диапазон эффективной виброизоляции в область низких частот (0,5–10 Гц).

Ключевые слова: двухкаскадная система виброизоляции, электродинамический компенсатор, коэффициент передачи усилия, частотная характеристика, устойчивость, датчик перемещения.

Введение

Пассивные системы виброизоляции с различными упругодиссипативными опорами давно и с успехом применяются, например, в судостроении для снижения вибрационной нагрузки на корпус судна. Если высокочастотные составляющие усилий виброактивных агрегатов хорошо ослабляются пассивной системой виброизоляции, то снижение нагрузки на корпус для низких частот является в настоящее время достаточно актуальной проблемой.

Если для целей виброзащиты нашли достаточно широкое применение активные виброзащитные системы (АВЗС), в которых в качестве силового устройства (актуатора) применяются гидравлические, электродинамические, пьезоэлектрические и другие устройства, то для целей виброизоляции, т.е. для уменьшения передачи усилия на основание, что особенно актуально для судостроения, активные системы практически не применяются, хотя создание эффективной системы виброизоляции на частотах 2–10 Гц и ниже является актуальной и нерешённой в настоящее время проблемой.

Принципиальные схемы и работа активных систем виброизоляции рассмотрены в работах [1–5].

В обзорной работе [1] дан подробный анализ и представлены предельные возможности активных систем с различными типами актуаторов (электродинамическими, магнитоэлектрическими, пьезоэлектрическими и т.д.), устанавливаемых между колеблющейся массой и корпусом, и работа которых определяется системой управления по сигналам акселерометра и датчика силы.

Активные системы виброизоляции повышают эффективность ослабления передачи усилия на

корпус по сравнению с пассивными системами в довольно узкой области частот за резонансом колебательной системы, могут иметь частоту настройки в этой области с минимальным значением коэффициента виброизоляции [6] и могут понижать значение резонансной частоты [7].

Уменьшение величины передаваемого усилия на корпус в дорезонансной области с помощью актуатора, установленного между колеблющейся массой и корпусом, принципиально невозможно, так как на этих частотах уменьшение амплитуды колебаний массы компенсируется увеличением усилия актуатора на корпус.

Для решения актуальной проблемы снижения усилия на корпус в области низких дорезонансных частот можно использовать силовые устройства, устанавливаемые на основание или на колеблющуюся массу и создающие инерционные динамические усилия в противофазе с усилием на основание от колеблющейся массы [3].

Эффективного снижения передачи усилий на основание позволяет применение системы двухкаскадной виброизоляции опорных связей.

Постановка задачи

Известно [2], что в двухкаскадной системе промежуточная рама с упругодиссипативными элементами вносит в систему виброизоляции дополнительные резонансы, что приводит к увеличению передачи усилия на основание в диапазоне частот этих резонансов.

При установке на промежуточной раме электродинамического компенсатора виброактивных сил (ЭДК) управление движением подвижного узла

с параметрами: $m_0 = 100$ кг, $m_1 = 10$ кг, $m_2 = 1$ кг, $c_0 = 3,55 \cdot 10^4$ Н/м, $c_1 = 9,870 \cdot 10^3$ Н/м, $b_0 = 37,6$ Нм/с, $b_1 = 6,28$ Нм/с, $c_2 = 10^3$ Н/м, $b_2 = 10$ Нм/с, $Bl = 10$ Тл·м; $L = 5 \cdot 10^{-3}$ Гн; $R = 10$ Ом; $K_{дн} = 100$ В/м.

Система виброизоляции с ЭДК в соответствии со структурной схемой на рис.2 представляет собой систему автоматического управления, характеристики которой и устойчивость при заданных параметрах зависят от коэффициента усиления K_0 .

Для численного решения системы уравнений (1) в программе Matlab/Simulink составлена модель (рис.3). Анализ устойчивости показывает, что при $K_0 \geq 2 \cdot 10^3$ система управления при приведённых выше параметрах становится неустойчивой (при $K_0 = 2 \cdot 10^3$ появляется комплексный корень характеристического уравнения с положительной действительной частью).

На рис.4 приведены частотные характеристики

$$K_{п}(\omega) = \frac{|R(i\omega)|}{|F(i\omega)|}, \quad (2)$$

где $R(i\omega) = (c_1 + b_1 i\omega)x_1$.

Обсуждение результатов

Анализ частотных характеристик на рис.4 показывает, что при установке ЭДК на промежуточной платформе значительно увеличивается диапазон частот эффективной виброизоляции и уменьшается влияние дополнительного резонанса на передачу усилия на основание. Для рассматриваемых параметров системы виброизоляции при $K_0 = 1000$ система эффективна при $f_{вн} > 2$ Гц (при резонансных частотах $f_0 > 3$ Гц, $f_1 > 5$ Гц).

Представляет также интерес рассмотреть и другие варианты как места установки ЭДК, так и организации системы автоматического управления ЭДК.

Выводы и заключение

Проведённое в данной работе исследование показывает, что в двухкаскадной системе виброизоляции установка электродинамического компенсатора на промежуточной раме и при выполнении условий устойчивости увеличивает диапазон частот, для которых ослабление передачи усилия на основание составляет 15–20 Дб. Для рассмотренного примера при $f_0 = 3$ Гц, $f_1 = 5$ Гц система виброизоляции эффективна при $f_{вн} > 2$ Гц.

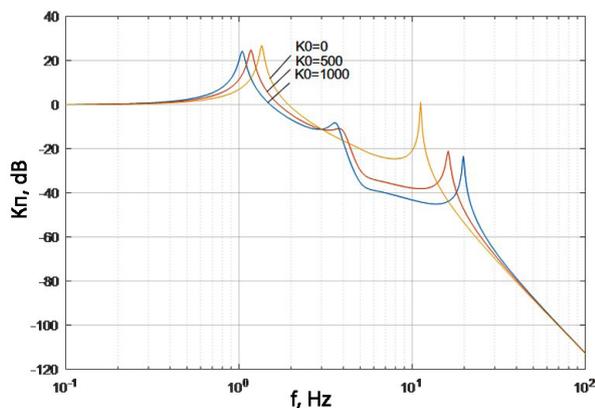


Рис. 4. Частотные характеристики $\Delta R(\omega)$
Fig. 4. frequency characteristic $\Delta R(\omega)$

1. Активная виброзащита – назначение, принципы, состояние. 1. Назначение и принципы разработки / А. В. Кирюхин, В. А. Тихонов, А. Г. Чистяков, В. В. Яблонский // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2011. № 2. С. 108–111.
2. Вибрации в технике: справ. В 6 т. / Под ред. К. В. Фролова. М.: Машиностроение, 1981. Т. 6. 456 с.
3. Пат. 2556867 С1 Российская Федерация, МПК В 63 G 8/34. Активная виброизолирующая система трубопроводов аварийной системы расхолаживания ядерного реактора подводной лодки / Кирюхин А. В., Федоров В. А., Мильман О. О. № 2013158496/07; заявл. 30.12.13; опубл. 20.07.15, Бюл. № 20
4. Елисеев С. В., Резник Ю. Н., Хоменко А. П. Мехатронные подходы в динамике механических колебательных систем: моногр. Новосибирск: Наука, 2011. 384 с. ISBN 978-5-02-018976-8.
5. Рыбак А. А., Синёв А. В., Пашков А. И. Синтез активных систем виброизоляции на космических объектах. М.: Янус-К, 1997. 160 с.
6. Бурьян Ю. А., Сорокин В. Н., Галуза Ю. Ф., Поляков С. Н. Активная виброизоляционная опора с экстремальной системой управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 9 (162). С. 41–45.
7. Петров А. А. Устойчивость одномассовой системы активной виброизоляции с обратной связью по силовому воздействию // XXVII сессия Российского акустического общества, посвященная памяти ученых-акустиков ФГУП «Крыловский государственный научный центр» А. В. Смолькова и В. И. Попкова, 16–18 апреля 2014 г. СПб., 2014. С. 1033–1043.
8. Вибрации в технике: справ. В 6 т. / Под ред. К. В. Фролова. М.: Машиностроение, 1981. Т. 4. 509 с.

БУРЬЯН Юрий Андреевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Основы теории механики и автоматического управления» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

СИТНИКОВ Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Основы теории механики и автоматического управления» ОмГТУ. Адрес для переписки: d.sitnikov@list.ru

КАЛАШНИКОВ Борис Александрович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Основы теории механики и автоматического управления» ОмГТУ.

ВОРОНОВ Евгений Александрович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Основы теории механики и автоматического управления» ОмГТУ.

МАКЕЕВ Сергей Александрович, доктор технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Строительные конструкции» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета, г. Омск.

Адрес для переписки: kafck@mail.ru

Для цитирования

Бурьян Ю. А., Ситников Д. В., Калашников Б. А., Воронов Е. А., Макеев С. А. Двухкаскадная система виброизоляции с электродинамическим компенсатором виброактивных сил // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2017. Т. 1, № 1. С. 40–43.

Статья поступила в редакцию 26.06.2017 г.

© Ю. А. Бурьян, Д. В. Ситников, Б. А. Калашников, Е. А. Воронов, С. А. Макеев

TWO-STAGE ACTIVE VIBRATION ISOLATION SYSTEM WITH ELECTRODYNAMIC COMPENSATOR OF VIBRO ACTIVE FORCES

Yu. A. Burian¹, D. V. Sitnikov¹, B. A. Kalashnikov¹,
E. A. Voronov¹, S. A. Makeyev²

¹Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

²The Siberian Automobile and Highway University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 5, 644080

The principle of constructing the two-stage active vibration isolation system is considered. In this system the electrodynamic compensator of the vibro active forces is installed on the intermediate frame. The movable mass motion control of compensator is carried out according to information from the absolute displacement sensor of the intermediate frame. The principle of dynamical inertial compensation of force consists in the fact that in the reciprocating motion of the mass of the movable assembly of the compensator the additional inertial force compensating for given frequency the vibro active force will be created. The principal scheme for the electrodynamic compensator control is given, the stability is evaluated. It is shown that the application of the electrodynamic compensator reduce the force transfer to the base by 20–30 dB and shifts the range of vibration isolation effective to the low frequency range (0,5–10 Hz).

Keywords: two-stage vibration isolation system, electrodynamic compensator, force transfer factor, frequency characteristic, stability, displacement sensor.

References

1. Kiryukhin A. V., Tikhonov V. A., Chistyakov A. G. [et al.]. Aktivnaya vibrozashchita — naznachenije, printsipy, sostoyaniye. 1. Naznachenije i printsipy razrabotki [Active vibration protect — purpose, principles, condition. 1. Function and development concepts] // Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii. *Mechanical Engineering and Automation Problems*. 2011. No. 2. P. 108–111. (In Russ.).
2. Frolov K. V. Vibratsii v tekhnike: Spravochnik. [Vibrations in engineering: Handbook]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1981. Vol. 6. 456 p. (In Russ.).
3. Patent 2556867 RF. MPK V 63 G 8/34. Aktivnaya vibrozoliruyushchaya sistema truboprovodov avariynoy sistemy raskholazhivaniya yadernogo reaktora podvodnoy lodki [Active antivibration system of pipelines of emergency cooling system of nuclear reactor of submarine]. Kiryukhin A. V., Fedorov V. A., Mil'man O. O. No. 2013158496/07. (In Russ.).
4. Eliseyev S. V., Reznik Yu. N., Khomenko A. P. Mekhatronnyye podkhody v dinamike mekhanicheskikh kolebatel'nykh sistem [Mechatronic approaches in dynamics of mechanical oscillation systems]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2011. 384 p. ISBN 978-5-02-018976-8. (In Russ.).
5. Rybak L. A., Sinev A. V., Pashkov A. I. Sintez aktivnykh sistem vibrozolyatsii na kosmicheskikh ob'yektakh [Synthesis of active vibration isolation systems on space objects]. Moscow: Yanus-K Publ., 1997. 160 p. (In Russ.).
6. Burian Yu. A., Sorokin V. N., Galuza Yu. F., Polyakov S. N. Aktivnaya vibrozolyatsionnaya opora s ekstremal'noy sistemoy upravleniya [Active vibration mount with extremal system control] // Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye. *Mechatronics, Automation, Control*. 2014. No. 9 (162). P. 41–45. (In Russ.).
7. Petrov A. A. Ustoychivost' odnomassovoy sistemy aktivnoy vibrozolyatsii s obratnoy svyaz'yu po silovomu vozdeystviyu [Stability of a single-mass active vibration isolation system with feedback on force] // Doklady XXVII sessii RAO [Reports of the XXVII session of Russian Acoustical Society]. Saint-Petersburg, 2014. P. 1033–1043. (In Russ.).

8. Frolov K. V. Vibratsii v tekhnike: Spravochnik [Vibrations in Engineering: Handbook]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1981. Vol. 4. 509 p. (In Russ.).

BURIAN Yuriy Andreevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Foundations of Theory of Mechanics and Automatic Control Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SITNIKOV Dmitriy Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Foundations of Theory of Mechanics and Automatic Control Department, OmSTU, Omsk.

Address for correspondence: d.sitnikov@list.ru

KALASHNIKOV Boris Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of Foundations of Theory of Mechanics and Automatic Control Department, OmSTU, Omsk.

VORONOV Evgeniy Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of Foundations of Theory of Mechanics and Automatic Control Department, OmSTU, Omsk.

MAKEYEV Sergey Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Head of the Building Constructions Department, Siberian State Automobile and Highway Academy, Omsk.

Address for correspondence: kafck@mail.ru

For citations

Burian Yu. A., Sitnikov D. V., Kalashnikov B. A., Voronov E. A., Makeyev S. A. Two-stage active vibration isolation system with electrodynamic compensator of vibro active forces // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2017. Vol. 1, no. 1. P. 40–43.

Received 26 June 2017.

© Yu. A. Burian, D. V. Sitnikov, B. A. Kalashnikov,
E. A. Voronov, S. A. Makeyev