

УДК 621.86.001.24

## Разработка магнитореологического виброгасителя для подъёмно-транспортных машин

Либерман Я.Л., Штерензон В.А., Летнев К.Ю., Горбунова Л.Н.

Рассмотрена проблема повышения безопасности при эксплуатации подъёмно-транспортных машин. Установлена зависимость возникновения вертикальных колебаний груза, которые могут привести к усталостным разрушениям металлоконструкций подъёмно-транспортных машин, обрыву каната, от массы груза и длины каната. Приведена экспериментальная установка для исследования вертикальных колебаний груза на тросовой подвеске и описан аппаратно-программный комплекс для обработки результатов.

*Ключевые слова:* надёжность и безопасность, вертикальные колебания груза, период колебаний, длина каната, автоматические системы торможения, магнитореологический виброгаситель.

### Введение

При резком торможении груза, поднимаемого или опускаемого подъёмно-транспортной машиной, типа крана, как известно, возникают вертикальные колебания груза и крюковой подвески, на которой груз закреплен. В результате снижается точность позиционирования груза, происходит усталостное разрушение металлоконструкций крана, возрастает опасность производственного травматизма и, в ряде случаев, даже увеличивается вероятность заболевания машиниста крана вибрационной болезнью. По данным Ростехнадзора, из общего числа кранов, находящихся в настоящее время в эксплуатации, около 60 % имеют те или иные опасные дефекты в виде усталостных трещин, расхождений сварных швов, деформаций элементов и т. д. Из-за дефектов подобного рода происходит более 25 % аварий. В связи с этим в течение многих лет была и остается актуальной задача совершенствования существующих и создания новых технических средств гашения вертикальных колебаний грузов при эксплуатации кранов. Один из путей решения такой задачи и рассматривается в настоящей работе.

Целью работы являлось создание более надежного, чем известные, устройства гашения колебаний на основе применения магнитореологической суспензии [1].

### Разработка магнитореологического виброгасителя

Поскольку демпфирующие свойства виброгасителей в значительной степени зависят от того, в какой среде происходят колебания используемого в них элемента массы, размещающая указанный элемент в магнитореологической суспензии и управляя ее вязкостью, можно сравнительно легко настраивать виброгаситель на ту или иную частоту собственных колебаний [2, 3]. Подстраивая частоту собственных колебаний под частоту вынужденных колебаний груза и крюковой подвески, нетрудно обеспечить резонанс и, как следствие, эффективное рассеивание энергии вынужденных колебаний и быстрое виброгашение. Технически это обычно реализуется путем установки на крюковой подвеске крана, наряду с магнитореологическим виброгасителем, датчика частоты колебаний, который через специальное управляющее устройство, соединяется с электромагнитной системой, создающей требуемое магнитное поле [4].

В настоящее время с развитием нанотехнологий производство магнитореологических суспензий становится все более и более простым. А потому, гашение колебаний с помощью магнитореологических виброгасителей оказывается все более и более перспективным. Тем не менее, на пути широкого приме-

нения таких виброгасителей есть препятствия. Установка на крюковой подвеске датчика частоты колебаний существенно снижает их надежность. Повысить надежность можно либо, измеряя частоту колебаний крюковой подвески дистанционно (например, с помощью лазера), либо определяя частоту косвенным способом. Последнее проще и дешевле, а потому для повышения надежности интересующих нас виброгасителей мы воспользовались именно таким способом.

Очевидно, что частота колебаний груза, закрепленного на крюковой подвеске, зависит от трех факторов: массы груза, длины каната, на котором закреплена крюковая подвеска, и от упругих свойств каната. Зная все это, принципиально возможно вычислить частоту, но для этого необходимо знать, как она и перечисленные факторы связаны. Для вычисления указанных связей было проведено экспериментальное исследование. При исследовании была использована электрическая канатная таль грузоподъемностью 0,5 т, обеспечивающая скорость подъема груза 0,13 м/с.

Таль состоит (рис. 1) из механизма подъема, механизма горизонтального передвижения типа тележки и крюковой подвески, содержащей крюк со шкивом, подвешенный на двухстороннем многожильном стальном канате диаметром 5 мм типа ЛК-0 (ГОСТ 3063–80). Механизм подъема – основная часть тали, задействованная в исследованиях.

Он включает в себя корпус, барабан с винтовой нарезкой, асинхронный электродвигатель, редуктор и дисковый тормоз с приводом от электромагнита постоянного тока. Электромагнит запитывается последовательно с одной из фаз обмотки электродвигателя через диоды, установленные в шкафу управления. Шкаф закреплен на корпусе механизма подъема и снабжен кнопочным подвесным пультом управления. По команде от пульта электродвигатель включается, электромагнит притягивает нажимной диск тормоза, и тор-

моз отключается. При выключении двигателя происходит обратное.

Для исследования был разработан и изготовлен специализированный аппаратно-программный комплекс (рис. 2). Он построен на базе типового компьютера PC и стандартной виброаппаратуры ВИБ-6ТН с входящим в нее датчиком виброускорения. В целом он состоит из следующих компонентов: компьютер, виброаппаратура с датчиком и устройства сопряжения блоков, представляющие собой переходную плату, и АЦП – аналого-цифровой преобразователь. Устройства сопряжения – нетиповые. Переходная плата – это особым образом соединенный набор сопротивлений и потенциометров для балансировки каналов, подключенный экранированным кабелем к контактному разъему платы АЦП и виброаппаратуры. Аналого-цифровой преобразователь – это плата АЦП и одновременно усилитель с максимальным коэффициентом усиления 10000, устанавливаемый в слот ISF компьютера.

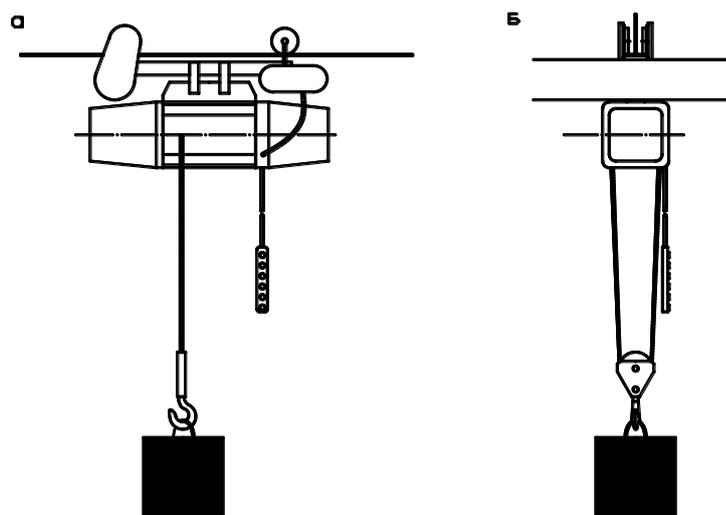
Аппаратно-программный комплекс адаптирован на работу с программой ADC8–TU, которая позволяет записывать экспериментально полученные графики. Эта программа ADC8–TU существует в двух версиях – оригинальной и модифицированной. В модифицированной версии имеются дополнительные функции, улучшающие пользовательский интерфейс и расширяющие возможности по приведению полученных графиков к виду, в большей степени соответствующему пользовательским задачам и потребностям. Они позволяют осуществлять ряд действий, упрощающих дальнейшую обработку полученных результатов или делающих ее или в принципе возможной, поэтому в процессе исследований использовалась именно модифицированная версия программы.

Сами исследования производились следующим образом. Канат нагружался определенной массой, груз устанавливался в крайнее

(верхнее или нижнее) положение, затем с помощью пульта управления талью его начинали перемещать. Считывая сигнал датчика, предварительно закрепленного на грузе, наблюдали за поведением графика на экране компьютера, ожидая, пока затухнут колебания, вызванные началом движения. После этого, также с помощью пульта, груз резко

затормаживали и записывали график виброускорения груза. По окончании колебаний, вызванных торможением, измеряли длину каната, при которой было произведено торможение.

Графики, полученные в результате экспериментов, при разных массах груза и длинах каната имеют вид, показанный на рис. 3.



в



**Рис. 1.** Электроталь канатная:

*а* – схема (главный вид); *б* – схема (вид слева); *в* – общий вид



Рис. 2. Общий вид специализированного аппаратно-программного комплекса

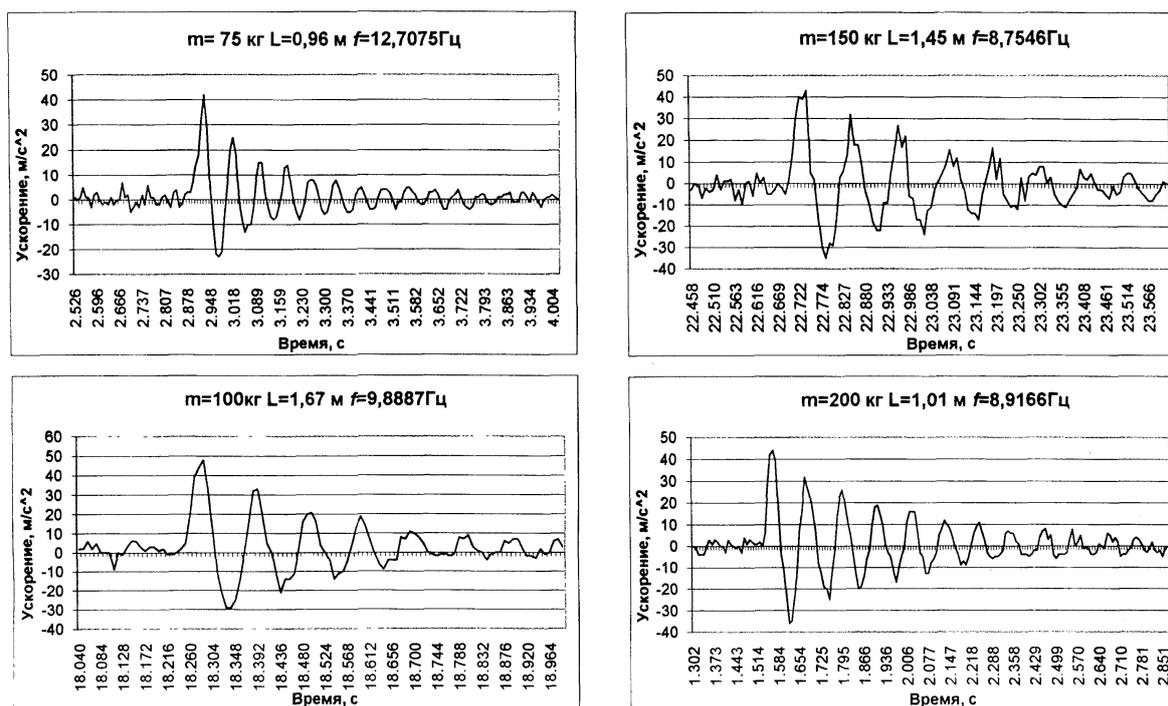


Рис. 3. Экспериментальные графики зависимости частоты колебаний груза от длины каната L и массы груза m

Поскольку виброускорения изменяются синхронно с перемещением груза при колебаниях, частоту колебаний можно измерять непосредственно по графикам и далее математически обрабатывать. Последнее наиболее

просто и удобно производить через создание конвертированных файлов с помощью пакета Statgraphics. Указанный пакет позволяет работать как с текстовыми, так и с числовыми данными. Наличие в нем всевозможных ма-

тематических, статистических и иных функций, а также использование макросов, диаграмм и других элементов, предоставляет практически неограниченные возможности по обработке данных. Благодаря этому, применив его для обработки графиков, полученных при записи колебаний груза при записи колебаний груза при различных сочетаниях  $m$  и  $L$  (массы груза и длины каната), результаты эксперимента удалось представить в виде табл. 1, а затем аппроксимировать функциями  $f = F(m, L)$ , где  $f$  – частота колебаний.

При аппроксимации использовались различные виды функций  $f = F(m, L)$ : линейная прямая, экспоненциальная, степенная, линейная обратная и полиномиальная. Для каждой из них вычислялся показатель корреляции с экспериментальными данными  $R^2$  (табл. 2). С учетом этого и производилась разработка магнитореологического виброгасителя более надежного, чем существующие.

В предлагаемом виброгасителе вместо датчика частоты, закрепляемого на крюковой подвеске крана, используются штатные, имеющиеся практически на каждом современном кране, датчики массы груза и длины каната. Эти датчики обычно располагаются не на крюковой подвеске, а вне ее (чаще всего в кабине машиниста крана, на крановой тележке и т. п.). Удаление же датчиков с крюковой подвески существенно снижает вероятность их поломки в процессе загрузки и особенно разгрузки крана, поскольку в последнем случае вероятность соударения груза или подвески с внешними предметами зачастую довольно высока (это можно наблюдать при строительных работах, крановой загрузке тяжелых металлорежущих станков в машиностроении и т. д.).

Схема предлагаемого виброгасителя показана на рис. 4. Она включает в себя магнитореологический виброгаситель 1, устанавлива-

емый на крюковой подвеске 2, датчик массы груза 3 и длины каната 4 и микропроцессорное устройство управления 5. Устройство управления в свою очередь состоит из вычислителя 6, аналого-цифрового 7 и цифро-аналогового 8 преобразователей. При эксплуатации крана датчики 3 и 4 формируют соответствующие сигналы, которые после преобразования в блоке 7 вводятся в вычислитель. Последний, будучи запрограммированным на расчет  $f$ , находит  $f$  и, после ее преобразования из цифровой формы в аналоговую, подает сигнал управления на электромагнитную систему виброгасителя. Тем самым обеспечивается настройка виброгасителя на требуемую частоту.

В настоящее время существуют компактные и весьма надежные типовые микропроцессорные устройства, выпускаемые комплектно с цифро-аналоговыми и аналого-цифровыми преобразователями. Они обладают малым энергопотреблением, низкой стоимостью и не требуют технического обслуживания.

В связи с этим, предлагаемый магнитореологический виброгаситель может быть применен достаточно широко. Единственная сложность при его использовании – первоначальная настройка. Она выражается в подборе постоянных коэффициентов и показателей степени в формуле

$$f = a \cdot m - b \cdot L - c$$

или

$$f = a - b \cdot m - c \cdot L + d \cdot m^2 + r \cdot L^2 + s \cdot m \cdot L.$$

Коэффициенты и показатели степени в них зависят от типа применяемого каната и для канатов разных марок, по-видимому, будут своими. Тем не менее, поскольку на каждом кране используется обычно один типоразмер канатов, это вряд ли может накладывать ощутимые ограничения на применение предлагаемого устройства.

Таблица 1. Зависимость частоты  $f$  колебаний груза от массы груза  $m$ , длины каната  $L$  и направления движения

Масса груза $m$ , кг	Опускание груза		Подъём груза		Масса груза $m$ , кг	Опускание груза		Подъём груза	
	Длина каната $L$ , м	Частота колебаний $f$ , Гц	Длина каната $L$ , м	Частота колебаний $f$ , Гц		Длина каната $L$ , м	Частота колебаний $f$ , Гц	Длина каната $L$ , м	Частота колебаний $f$ , Гц
50	1,13	12,3001	1,35	12,2699	150	1,12	9,3897	0,94	9,7847
	1,26	12,2699	1,51	11,0742		1,19	9,1158	1,04	9,5420
	1,43	11,4679	1,59	11,9332		1,34	9,2507	1,14	9,6061
	1,72	10,9890	1,71	11,6550		1,45	8,7566	1,24	9,2166
	1,79	11,0742	1,78	11,5207		1,54	8,9127	1,32	9,0498
	1,85	11,3636	1,87	10,9170		1,63	8,8731	1,41	8,9526
	1,96	10,5496	1,95	11,6550		1,76	8,5106	1,47	8,8968
	2,09	11,4548	2,08	10,8108		1,82	8,4175	1,53	8,6430
	2,25	10,6724	2,14	10,9409		1,86	8,3542	1,62	8,7413
	75	0,96	12,3001	0,88		12,6103	175	1,01	9,3809
1,18		12,1065	1,09	12,4844	1,15	8,9847		1,02	9,4697
1,36		11,8624	1,23	11,7647	1,3	8,3752		1,17	9,0090
1,40		11,6144	1,38	11,6414	1,44	8,3893		1,24	8,7833
1,54		11,2486	1,44	11,2233	1,5	8,1037		1,34	9,0827
1,63		10,8932	1,57	11,0742	1,6	8,4104		1,44	8,1900
1,80		10,4275	1,68	11,1857	1,72	8,1169		1,50	8,3542
2,06		10,1420	1,76	11,1483	1,78	8,1699		1,61	8,2850
2,14		9,8522	1,78	10,7296	1,87	8,4317		1,70	8,0645
2,30		9,8039	1,98	10,8108	1,9	7,8802		1,74	8,1301
100	1,08	11,4155	0,92	12,3762	200	1,01	8,9127	0,86	9,4697
	1,22	11,1982	1,04	11,5473		1,1	9,2507	1,09	8,8107
	1,32	10,5263	1,19	11,1607		1,29	8,4246	1,16	8,5837
	1,4	10,4822	1,35	10,2041		1,32	8,4962	1,26	8,8889
100	1,48	9,6712	1,44	10,0301	200	1,41	8,1235	1,35	8,3542
	1,60	10,2459	1,54	10,2564		1,47	8,2372	1,44	8,1699
	1,67	9,8912	1,60	10,1626		1,52	8,4175	1,51	8,1169
	1,74	9,7182	1,70	9,6712		1,62	7,9681	1,61	8,3195
	1,92	9,4251	1,79	9,6618		1,7	7,7760	1,69	7,8802
	2,03	9,6154	1,86	9,6339		1,9	7,4963	1,79	7,9051
125	0,9	11,2486	1,0	10,5708	225	1,0	8,6730	0,92	8,9526
	1,07	11,0497	1,08	10,4279		1,08	8,9767	1,1	8,6059
	1,18	10,5820	1,22	10,1420		1,18	8,8028	1,21	8,2645
	1,31	10,2564	1,32	9,8912		1,27	8,6806	1,28	8,2372
	1,39	9,8039	1,42	9,8717		1,35	8,0580	1,32	8,3333
	1,6	9,4697	1,48	9,6805		1,47	7,7340	1,4	8,0064
	1,67	9,4251	1,62	9,5420		1,55	7,8864	1,48	8,0972
	1,75	9,1827	1,75	9,3371		1,65	7,6104	1,58	7,9302
	1,9	9,0009	1,8	0,1743		1,75	7,6805	1,6	7,9114
	2,02	8,9606	1,88	9,0416		1,88	7,0922	1,69	7,5758

Таблица 2. Математическое описание зависимости  $f$  от  $m$  и  $L$ 

Режим эксперимента	Номер функции	Аппроксимирующая функция $f = F(m, L)$	$R^2, \%$
Опускание груза	1	$f = 14,1937 - 0,0219189 \cdot m - 1,18239 \cdot L$	91,8029
	2	$f = \exp(2,73458 - 0,00230794 \cdot m - 0,12325 \cdot L)$	92,9199
	3	$f = e^{3,59871 \cdot m^{-0,267948} \cdot L^{-0,191976}}$	93,5932
	4	$f = 5,4562 + 236,398 \cdot (1/m) + 2,6001 \cdot (1/L)$	87,4568
	5	$f = 7,24576 + 238,031 \cdot [1/(m + L)]$	78,4802
	6	$f = 15,8225 - 0,0442935 \cdot m - 1,6236 \cdot L + 0,000828595 \cdot m^2 + 0,121737 \cdot L^2 + 0,0000141647 \cdot m \cdot L$	95,0513
Подъём груза	7	$f = 13,8647 - 0,0221776 \cdot m - 0,909419 \cdot L$	90,6439
	8	$f = \exp(2,69264 - 0,00228459 \cdot m - 0,0940278 \cdot L)$	92,5732
	9	$f = e^{3,56753 \cdot m^{-0,264177} \cdot L^{-0,149803}}$	94,7171
	10	$f = 5,87295 + 237,336 \cdot (1/m) + 2,01522 \cdot (1/L)$	89,4835
	11	$f = 7,36842 + 238,344 \cdot [1/(m + L)]$	83,5971
	12	$f = 16,73 - 0,049479 \cdot m - 2,74993 \cdot L + 0,0000974004 \cdot m^2 + 0,548813 \cdot L^2 + 0,00100862 \cdot m \cdot L$	95,2514
Подъём и опускание груза	13	$f = 14,059 - 0,02208 \cdot m - 1,06748 \cdot L$	91,1094
	14	$f = \exp(2,71674 - 0,002298 \cdot m - 0,0940278 \cdot L)$	92,6405
	15	$f = e^{3,58376 \cdot m^{-0,266274} \cdot L^{-0,171863}}$	94,0575
	16	$f = 5,66672 + 237,085 \cdot (1/m) + 2,29054 \cdot (1/L)$	88,4242
	17	$f = 7,30352 + 238,574 \cdot [1/(m + L)]$	80,9701
	18	$f = 15,8895 - 0,0467482 \cdot m - 1,60954 \cdot L + 0,0000915177 \cdot m^2 + 0,145581 \cdot L^2 + 0,0000618428 \cdot m \cdot L$	95,0248

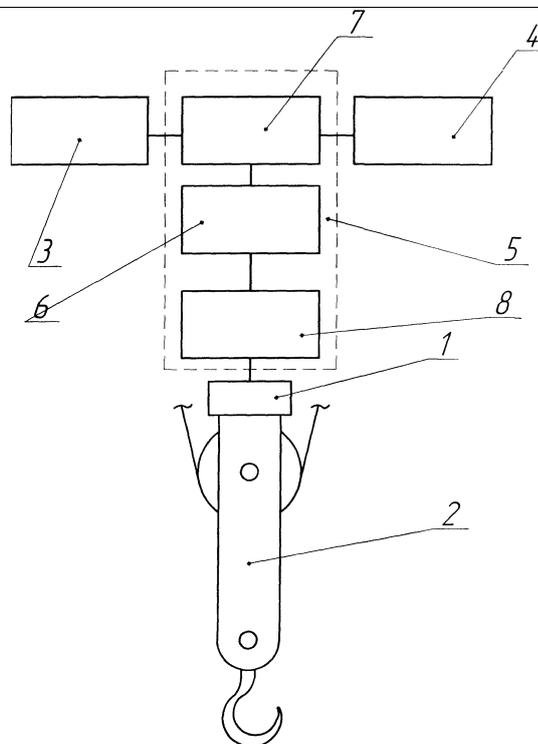


Рис. 4. Схема виброгасителя

### Выводы

Таким образом, экспериментально установлена зависимость возникновения вертикальных колебаний груза, которые могут привести к усталостным разрушениям металлоконструкций подъемно-транспортных машин, обрыву каната и т. п., от массы груза и длины каната. С учетом полученных результатов разработан магнитогеологический виброгаситель для подъемно-транспортных машин.

### Литература

1. Шлиомис М. И. Эффективная вязкость магнитных суспензий // ЖЭТФ, 1971, вып. 6(12), с. 2411–2418.

2. Кеваев Н. М., Кудряков Ю. Б., Дубровин Н. А. и др. Магнитожидкостное устройство для активного гашения колебаний / Авторское свидетельство СССР № 1433137, кл. А166/00, 1988.

3. Орлов Д. В., Михалев Ю. О., Мышкин Н. К. и др. Магнитные жидкости в машиностроении. М.: Машиностроение, 1993, 268 с.

4. Кабаков А. М., Пабат А. И., Орлов А. Н. Защита машиниста крана от вибраций // Безопасность труда в промышленности, 1997, № 5, с. 25–27.

**Статья поступила в редакцию 16 июня 2012 г.**

---

Article is devoted to a problem of rise of safety at maintenance of hoisting-and-transport computers. Dependence of occurrence of vertical oscillations of cargo which can lead to fatigue failures metal constructions of hoisting-and-transport computers, to a rope breakaway from weight of cargo and length is installed. In article experimental installation for research of vertical oscillations of cargo on a rope suspension bracket is resulted and the hardware-software complex for processing of results is described.

*Keywords:* reliability and safety at maintenance, vertical oscillations of cargo, the period of oscillations, length of a rope, automatic systems of braking, magnetorheological vibration damper.

---

*Либерман Яков Львович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлообрабатывающие станки и комплексы» Уральского федерального университета

*Штерензон Вера Анатольевна* – доцент кафедры «Информационные технологии» Уральского федерального университета

*Летнев Константин Юрьевич* – ассистент кафедры «Подъемно-транспортные машины» Уральского федерального университета

*Горбунова Любовь Николаевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная экология и безопасность жизнедеятельности» Сибирского федерального университета