

гой ион гидросила, происходит подобное взаимодействие. В итоге образуется гидроксид катиона, а оставшиеся во внутренней сфере молекулы воды выталкиваются в водный раствор.

Электрод из титанового сплава, как это было установлено, практически выполняет функцию анода. За счет пульсирующего характера тока создаются благоприятные условия для восстановления ионов металлов, что подтверждается рядом исследований [8].

Дальнейшие работы будут направлены на установление зависимости степени очистки от параметров процесса и свойств удаляемых ионов.

Библиографические ссылки

1. Ключков Б. Я. Экологические проблемы гальванотехники // *Машиностроитель*. № 6. 1997. С. 33–35.
2. Водное хозяйство промышленных предприятий : справ. В 2 кн. Кн. 1 / В. И. Аксенов, М. Г. Ладыгичев, И. И. Ничкова [и др.] ; под ред. В. И. Аксенова. М. : Тепло-техник, 2005.
3. Яковлев С. В., Воронов Ю. В. Водоотведение и очистка сточных вод. М. : АСВ, 2004.

4. Способ очистки воды и водных растворов от анионов и катионов : пат. Рос. Федерации № 2213701 : С 02 F 1/46//С 02 F 103:16 / А. И. Стрюк, И. Я. Шестаков, А. А. Фадеев [и др.] : опубл. 10.10.2003. Б. И. № 28.

5. Установка очистки воды и водных растворов от анионов и катионов. Стрюк А. И., Шестаков И. Я., Фадеев А. А. [и др.] : а. с. № 18532, С 02 F 1/46. ; опубл. 27.06.2001. Б. И. № 18.

6. Шестаков И. Я., Вдовенко В. Г. Способ электрохимической очистки воды и водных растворов от ионов тяжелых металлов : а. с. № 1724591, С 02 F 1/46 ; опубл. 07.04.1992. Б. И. № 13.

7. Шестаков И. Я., Герасимова Л. А. Исследование электрохимических способов очистки воды и водных растворов от ионов тяжелых металлов : сб. статей / САА. Красноярск, 1996. С. 32–35.

8. Шульгин Л. П. Электрохимические процессы на переменном токе. Л. : Наука ; Ленингр. отд-ние, 1974.

9. Костин Н. А. Кинетика и электродные процессы в водных средах. Киев : Наук. думка, 1983.

10. Корчинский Г. А. Влияние конвективной диффузии на электрохимическое выпрямление // *Журн. физической химии*. Т. 55. № 10. 1981. С. 2650–2653.

O. V. Raeva, I. Ya. Shestakov, O. V. Feiler

ON MECHANISM OF DISCHARGED WATERS ELECTROCHEMICAL CLEANING WITH ALTERNATING CURRENT

Energy consumption, equipment unhandiness and need for consumable materials hinder wide implementation of electrochemical technologies for cleaning water and water solutions. This article presents the results of testing electrochemical method of industrial discharged water cleaning and the mechanism of the process.

Keywords: discharged waters, electrochemical method, mechanism of the process, alternating current.

© Раева О. В., Шестаков И. Я., Фейлер О. В., 2011

УДК 621.313:62-567

Р. Н. Хамитов, Г. С. Аверьянов, А. А. Татевосян

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЕ ДЕМПФИРОВАНИЕ В СИСТЕМАХ АМОРТИЗАЦИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБЪЕКТОВ

Предложено виброзащитное устройство с электромеханическим демпфером для крупногабаритных объектов с пониженной вибрацией при динамических нагрузках. Виброзащитное устройство на базе электродвигателя рассматривается как электротехнический комплекс. Сформулированы задачи для развития данного направления виброзащиты.

Ключевые слова: активная система демпфирования, электромеханический демпфер, пневмоамортизатор, электротехнический комплекс.

Вибродарозащитные устройства (ВЗУ) крупногабаритных объектов содержат амортизаторы различных видов и гидродемпферы [1]. Амортизатор обычно является пневмоамортизатором (ПА) с наличием воздушного демпфирования или без него. Для устранения виброударопо-

роводимости и других недостатков гидродемпфера в динамических режимах работы ВЗУ предлагается вместо них применять электромеханический демпфер на базе асинхронной машины (АМ). ВЗУ является комбинированным и содержит ПА, обеспечивающий статическую

нагрузку (несущую способность) ВЗУ, и электромагнитный демпфер на базе АМ, работающий только в динамических режимах работы ВЗУ. ВЗУ представляет собой электротехнический комплекс, предназначенный для преобразования механической энергии колебаний амортизируемого объекта (АО) в тепловую энергию, рассеиваемую в роторной цепи АМ, или в электрическую энергию, отдаваемую с помощью обратимых преобразователей в сеть (источник питания) АМ. Для проектирования оптимальных ВЗУ, выбора параметров компенсаторной силы АМ и режима торможения АМ необходимо разработать динамическую модель пневмоэлектромеханической системы «ПА – демпфер на базе АМ».

Пример запатентованной конструкции ВЗУ приведен на рис. 1. Блок управления ВЗУ обеспечивает работу демпфера только в режиме отбоя ПА (одностороннее демпфирование) на основе сигнала преобразователя перемещений. В качестве АМ используется трехфазный асинхронный электродвигатель (АД), работающий на ходе отбоя ПА в режиме торможения противовключением и создающий компенсаторную электромагнитную силу [2].

Моделирование пневмоэлектромеханической системы в динамике построим на базе совместного рассмотрения процессов в пневматической, механической и электрической подсистемах, образующих комплекс ВЗУ в целом, на основе расчетной схемы и с учетом известных допущений. Если рассматриваемая одностепенная система (рис. 1, б) выведена из положения равновесия, то она совершает свободные колебания. При этом на систему действуют: сила инерции $M \cdot Z''$; сила тяжести Mg ; сила давления воздуха в объемах ПА (упругая сила); сила трения в резинокордной оболочке (РКО) R_{Σ} ; компенсаторная сила электромагнитного демпфера AF_3 .

В общем виде система дифференциальных уравнений движения АО для свободных колебаний запишется в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{dP}{dt} = -\frac{k \cdot P \cdot S_3 \cdot \dot{z}}{V_0 + S_3 \cdot z}, \\ \ddot{z} = \frac{dz}{dt}, \\ M \cdot \ddot{z} + (P - P_0) \cdot S_3 + R_{\Sigma} \cdot \text{sign} \dot{z} + AF_3 \cdot \text{sign} \dot{z} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где z, \dot{z}, \ddot{z} – вертикальные перемещения, скорость и ускорение АО; P – текущее давление сжатого газа упругого элемента ПА; A – режимный коэффициент электромагнитного демпфера; V_0 – начальный объем ПА при статическом положении АО; k – коэффициент адиабаты (для воздуха $k = 1,4$); M – масса АО; S_3 – эффективная площадь упругого элемента ПА; P_0 – давление сжатого воздуха упругого элемента ПА в статическом положении АО; R_{Σ} – сила трения в РКО.

Сила инерции $M \cdot \ddot{z}$ АО создает на валу АМ момент сопротивления M_c :

$$M_c = M \cdot \ddot{z} \cdot R_B, \quad (2)$$

где R_B – плечо приложения силы к валу АМ (радиус барабана).

Компенсаторная сила электромагнитного демпфера F_3 зависит от значения режимного коэффициента A и элек-

тромагнитного момента M_3 , создаваемого АД ($F_3 = M_3 / R_B$):

$$A = \begin{cases} 1 & \text{при } \dot{z} > 0, \\ 0 & \text{при } \dot{z} < 0. \end{cases} \quad (3)$$

В качестве модели электрической подсистемы рассматривалась модель трехфазной обобщенной асинхронной машины [3].

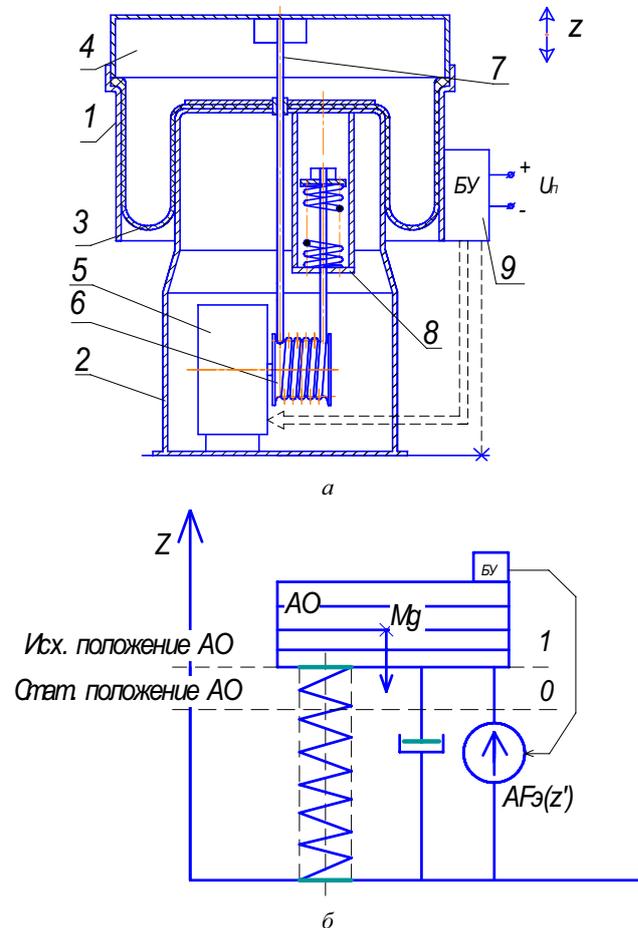


Рис. 1. Комбинированное виброзащитное устройство: а – конструкция: 1 – подвижная часть (обойма); 2 – неподвижная часть; 3 – РКО; 4 – пневматический упругий элемент; 5 – АМ; 6 – барабан с тросом; 7 – трос; 8 – устройство натяга троса; 9 – блок управления; б – расчетная схема динамики

Моделирование процессов в ВЗУ проводилось с помощью программы Matlab с расширением Simulink. Схема набора приведена на рис. 2.

Результаты решения системы уравнений для одностороннего демпфирования при свободных колебаниях приведены на рис. 3–5 при следующих параметрах ПА и АМ и исходных (начальных) данных:

1. Параметры ПА с РКО И-10: $M = 1\,500$ кг; $P_{\text{стат}} = 0,396 \cdot 10^6$ Па; $K = 1,41$; $S_3 = 0,03$ м²; $R_B = 0,05$ м; $g = 9,81$ м/с²; $R_{\Sigma} = 0,01$ Mg; $P_0 = 0,203\,5 \cdot 10^6$ Па; $V_0 = 0,005$ м³; $Z_0 = 0,1$ м; $(dz/dt)_0 = 0$ м/с².

2. Параметры АМ: выбранная модель АД из библиотечных моделей – 10HP460V60Hz1760RPM, система координат – вращающаяся, связана с ротором (оси d и q); $P_n = 7,46$ кВт; $R_s = 0,683\,7$ Ом; $L_{ls} = 0,004\,152$ Гн; $R_r = 0,451$ Ом; $L'_{lr} = 0,004\,152$ Гн; $L_m = 0,148\,6$ Гн; $J = 0,05$ кг·м²; $p = 2$.

3. Питающее симметричное трехфазное напряжение АД: $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$; $f = 50 \text{ Гц}$.

При расчете модели был выбран неявный метод интегрирования Рунге-Кутты в начале решения и метод, использующий формулы обратного дифференцирования 2-го порядка, в последующем – ode23tb с автоматичес-

ким выбором параметров метода. Время переходного процесса $t_{\text{ин}}$ определялось по «вхождению» кривой свободных колебаний АО в коридор $\pm 0,01 \text{ м}$.

Таким образом, на базе данной модели возможно оптимизировать режим колебаний управляемых ВЗУ АО, время переходного процесса при применении в качестве

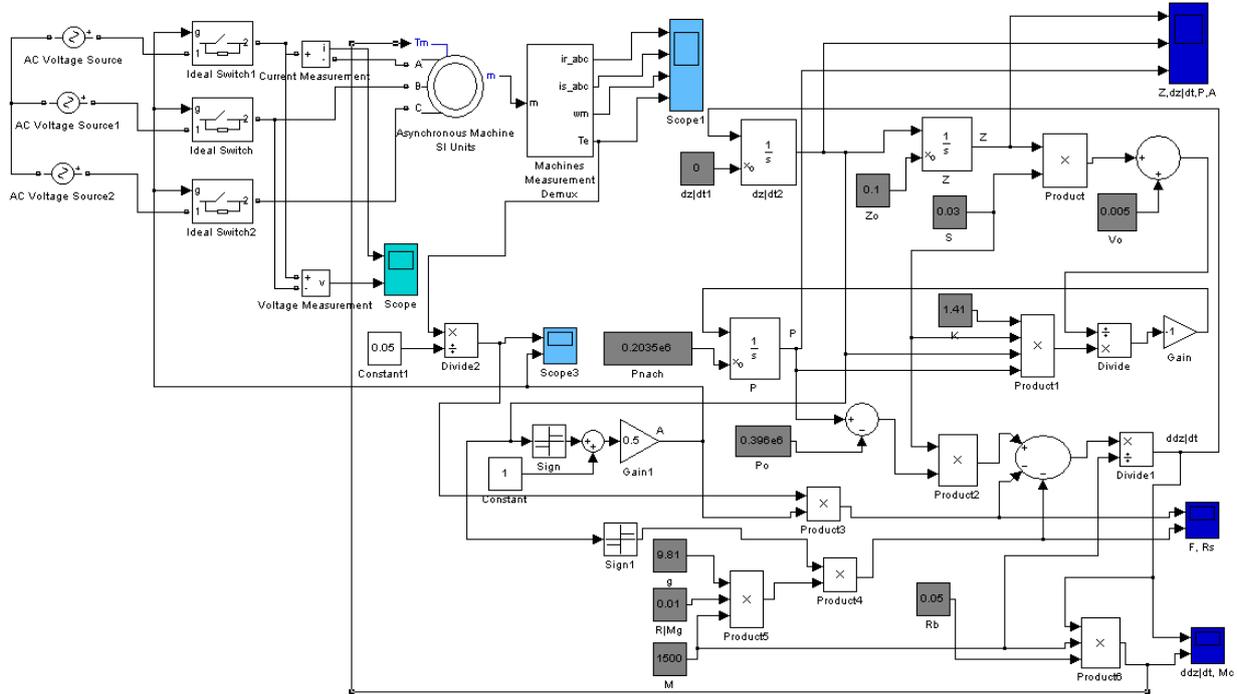


Рис. 2. Имитационная модель ВЗУ

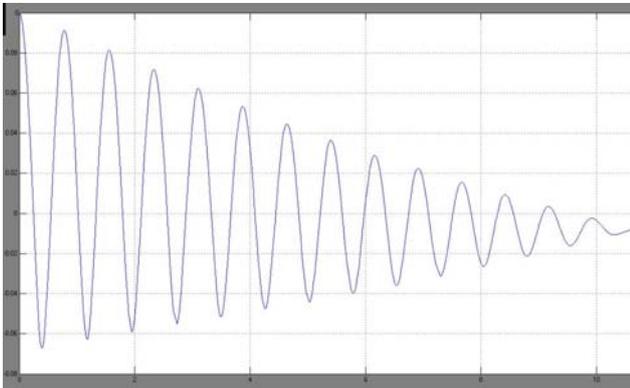


Рис. 3. Свободные колебания АО при отключенном электромеханическом демпере $Z(t)$ ($t_{\text{ин}} = 10,8 \text{ с}$)

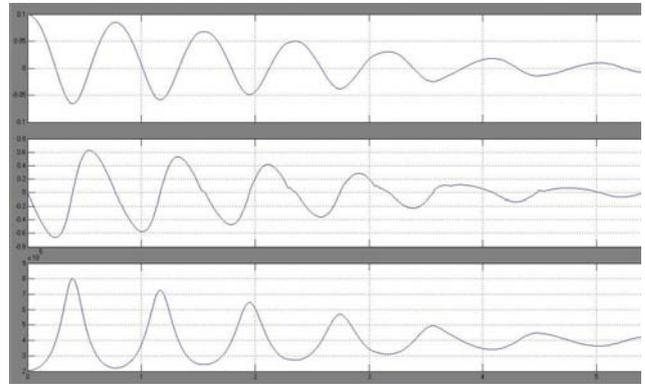


Рис. 4. Свободные колебания АО при включенном однофазовом электромеханическом демпере $Z(t)$, $V(t)$, $P(t)$ ($t_{\text{ин}} = 6,5 \text{ с}$)

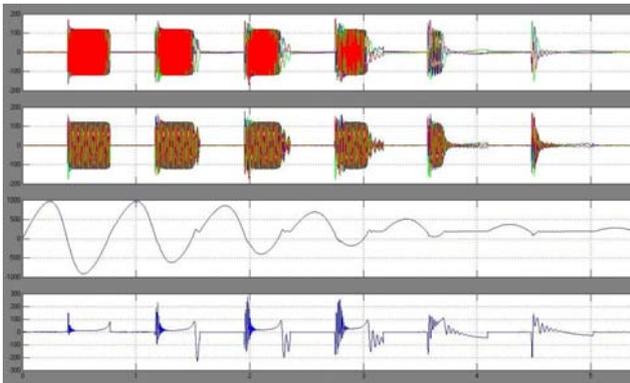


Рис. 5. Осциллограммы основных величин однофазового электромеханического демпера $i_{\text{tot}}(t)$, $i_{\text{ст}}(t)$, $w(t)$, $M_s(t)$ ($t_{\text{ин}} = 6,5 \text{ с}$)

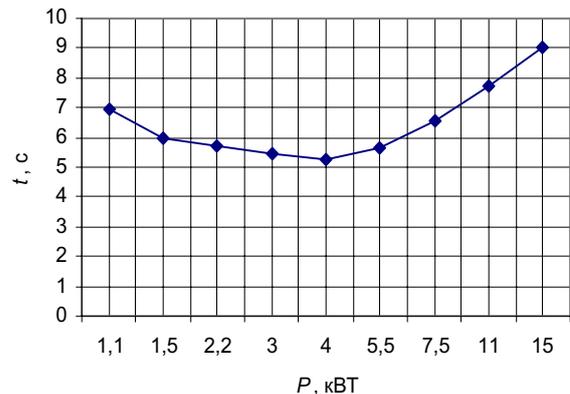


Рис. 6. Зависимость времени переходного процесса от мощности АД

демпфера АМ сократилось практически в два раза, т. е. АМ эффективно использовать в качестве демпфера в конструкциях «длинноходовых» ВЗУ.

При использовании в качестве демпферов АД серии РА производства Ярославского электромеханического завода, различных по мощности, при питании непосредственно от сети расчеты по данной модели показали результаты, приведенные в таблице и на рис. 6. Параметры схемы замещения АД определялись по методике, приведенной в [4]. При питании непосредственно от сети данного ВЗУ видно, что время переходного процесса снижается при росте мощности АД до значения 4 кВт, что является оптимальным значением для данного ВЗУ.

Предлагаемое направление по использованию ЭТК в ударовиброзащите может быть рекомендовано для более детального исследования и внедрения в системах амортизации крупногабаритных объектов. Достоинством использования АД в ВЗУ является их широкая номенклатура по типам, по мощности, по конструктивным исполнениям и т. д. [5; 6], что отвечает разнообразным условиям

эксплуатации систем амортизации крупногабаритных объектов, а также дает возможность регулирования их характеристик за счет частотного управления.

Библиографические ссылки

1. Гидропневматическая подвеска и ее упругодемпфирующие характеристики / Б. Н. Фитилев [и др.] // Инженерный журнал. 2007. № 11. С. 62–64.
2. Коловский М. З. Автоматическое управление виброзащитными системами. М. : Наука, 1976.
3. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин. М. : Высш. шк., 1987.
4. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем. СПб. : КОРОНА-Принт, 2001.
5. Электротехнический справочник : в 4 т. Т. 2. Электротехнические изделия и устройства / гл. ред. И. Н. Орлов. М. : МЭИ, 2003.
6. Электродвигатели. Каталог ВЭМЗ. Владимир : ВЭЗМ, 1997.

Расчет переходного процесса при различных по мощности АД

Марка двигателя	$P_{ном}$, кВт	R_s , Ом	R'_r , Ом	L_{ls} , Гн	L'_{lr} , Гн	L_m , Гн	t , с
РА90S4	1,1	10,389 4	2,3297	0,0103	0,0103	0,3794	6,95
РА90L4	1,5	7,080 5	1,787	0,0077	0,0077	0,2846	5,96
РА100LA4	2,2	5,379 7	1,6774	0,0057	0,0057	0,2396	5,7
РА100LB4	3	3,309	1,167	0,0039	0,0039	0,167	5,48
РА112M4	4	1,874 8	0,8179	0,0029	0,0029	0,1409	5,28
РА132S2	5,5	1,886 8	0,5303	0,0022	0,0022	0,138	5,66
РА132M2	7,5	1,686	0,3488	0,0016	0,0016	0,1012	6,59
РА160MA4	11	0,654 6	0,2107	0,0012	0,0012	0,0614	7,7
РА160ML4	15	0,397 8	0,1653	0,0008	0,0008	0,0483	9,0

R. N. Khamitov, G. S. Averjanov, A. A. Tatevosjan

ELECTROMECHANICAL DAMPING IN VIBRATION PROTECTION SYSTEMS OF LARGE-SIZE OBJECTS

The authors offer a vibration protection device with electromechanical damper for large-size objects with lowered vibration at dynamic loadings. The vibration protection device on the basis of electric motor is considered as an electrotechnical complex. Problems of development of the given vibration protection direction are formulated.

Keywords: active damping system, electromechanical damper, pneumoshock-absorber, electrotechnical complex.

© Хамитов Р. Н., Аверьянов Г. С., Татевосян А. А., 2011