

УДК 628.517.4.

**Чудинов Владислав Александрович**

*Chudinov Vladislav Alexandrovich*

студент, кафедра Автомобили технологические машины,  
автодорожный факультет,  
Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет  
г. Пермь, Российская Федерация

**Бруданов Антон Михайлович**

*Brudanov Anton Mikhailovich*

студент, кафедра Автомобили технологические машины,  
автодорожный факультет,  
Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет  
г. Пермь, Российская Федерация

## **УПРАВЛЕНИЕ СВОБОДНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО АМОРТИЗАТОРА ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ**

**Аннотация:** В промышленных роботах, использующих позиционирование по упорам, для снижения динамических нагрузок и уменьшения динамической составляющей ошибки применяют специальные демпфирующие устройства. Однако при изменении скоростей движения и масс рабочих органов (РО) в широких пределах такие устройства требуют перестройки своих параметров. Использование амортизаторов в качестве упругих упоров позволяет реализовать максимальные скорости движения РО и снижение динамических нагрузок в момент удара об упор.

Необходимые характеристики качества амортизации могут быть получены в результате построения систем с переменной структурой, являющихся ввиду разрывного управления существенно нелинейными системами. Функционирование системы с переменной структурой осуществляется мгновенным устранением и восстановлением, при помощи логических элементов переключения, связей между ее отдельными звеньями и использованием полезных локальных свойств этих звеньев [1]. В энергетическом аспекте системы амортизации переменной структуры более выгодны, чем активные системы виброзащиты, так как энергия в них расходуется только на управление параметрами.

**Ключевые слова:** управление, пневматический амортизатор, движение.

**Annotation:** The industrial robots using positioning the stops to reduce dynamic loads and reduce the dynamic error component used special damping devices. However, when changing the speeds of the masses and working organs (PO) in a wide range such devices require the adjustment of its parameters. The use of

shock absorbers as elastic thrusts allows for the maximum speed of the PO and the reduction of dynamic loads at the time of hitting the fence.

Necessary characteristics depreciation quality can be obtained as a result of the construction of systems with variable structure, which are due to discontinuous control essentially nonlinear systems. Operation of the system variable structure provides instant removal and restoration, using the logic switching elements, relations between its individual links and the use of local mineral properties of these units [1]. In the energy aspect of the amortization of the system of variable structure are more advantageous than the active vibration isolation system as well as the energy they expended only on the parameters of control.

**Keywords:** control, pneumatic shock absorber movement.

Рассмотрим совместные свободные колебания рабочего органа и амортизатора, возникающие в окрестности положения позиционирования из-за нулевой начальной скорости РО. Амортизатор выполнен в виде пневмоэлемента (ПЭ) постоянной площади 4 (например, сильфонного типа) (рис.1), образующего основной объем (ОО), установленного между основанием 3 и упорной пластиной 5. В канале, соединяющем полость сильфона с дополнительным объемом (ДО) 1, установлен электромагнитный клапанный элемент 2. При помощи блока управления клапана 8 формируется закон подключения дополнительного объема по сигналу от датчиков координаты 7 и скорости 6 рабочего органа. При расчете релейных законов управления, проходное сечение канала принималось большим, поэтому сопротивление циркуляции воздуха между основным и дополнительными объемами можно пренебречь.

Управление свободного движения РО в окрестности положения позиционирования запишется:

$$\ddot{x} + (P_{00} - P_0) \frac{S}{m} = 0$$

где  $m$  – масса РО;  $P_{00}$  – давление газа в пневмоэлементе в положении равновесия (позиционирования)  $P_{00} = \frac{F_{np}}{S} + P_B$ ;

$S$  – площадь опорной поверхности пневмоэлемента,  $F_{np}$  – сила поджатия РО к упору (пневмоэлементу);  $x$  – координата РО относительно положения позиционирования;  $P_B$  – давление окружающей среды.

Давление газа в пневмоэлементе будет определяться выражением из [2,3]:

$$P_0 = P_{00} \left( \frac{V_{00}^v}{V_0} \right) \left( \frac{Q_{00} + \Delta Q_{01}^j}{Q_{00}} \right) = P_{00} \left( \frac{H_0^v}{H_0 + X} \right) \left[ \frac{(1 + K)(H_0 + X)}{H_0(1 + K) + X} \right]$$

где  $v, j$  – показатели политропы;  $K = V_g/V_{00}$ ;  $V_{00}$ ,  $H_0$  – объем и высота сильфона в положении равновесия;  $V_g$  – объем дополнительной полости;  $Q_{00} = \frac{P_{00}V_{00}}{RT}$  – масса газа в основном объеме в положении равновесия; масса

газа, перетекшего из основного в дополнительный объемы –  $\Delta Q_{01} = \frac{P_{00}V_{00}KX}{RT[H_0(1+K)+X]}$ , где  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – температура газа.

Упругая характеристика пневмоэлемента, определенная по выражению

$$F = P_{00}S \left\{ 1 - \left( \frac{H_0}{H_0 + X} \right)^v \left[ \frac{(1 + K)(H_0 + X)}{H_0(1 + K) + X} \right]^j \right\}$$

Приведена на рис.2 для значений параметров  $P_{00} = 150000$  Н/м,  $S = 0.002$  м<sup>2</sup>,  $v = 1,3$ ,  $j = 1,15$ ;  $K = 0,1,5$ ;  $H_0 = 0,1$  м;  $m = 10$  кг.

Линеаризованная жесткость ПЭ в окрестности положения равновесия РО определяется

$$C_0 = \frac{P_{00}Sv}{H_0(1 + K)}, \quad (1)$$

Из выражения (1) видно, что с ростом величины дополнительного объема ( $K$ ), жесткость ПЭ падает.

Механические колебательные системы с управляемыми параметрами позволяют реализовать режим изменения структуры, который заключается в том, что, дополнительно к основной, формируется структура со сдвинутым положением равновесия (сдвинутым устойчивым фокусом на фазовой плоскости). Для консервативных систем величина сдвига должна быть равна половине амплитуды свободных колебаний и иметь знак координаты (рис.3). Изображающая точка из любой допустимой области начальных условий ( $x_0, \dot{x}_0$ ) попадает в окрестность устойчивого фокуса с помощью двух следующих переключений: с основной структуры – на структуру со сдвинутым фокусом (точка 1); обратное переключение в окрестности устойчивого фокуса на основную структуру (точка 2). При этом изображающая точка описывает траекторию, лежащую максимум в двух квадрантах фазовой плоскости.

Движение на первом участке будет происходить в соответствии с уравнением  $\ddot{x} + \omega_1^2 x = 0$ , а на втором –  $\ddot{x} + \omega_2^2(x - \frac{A}{2} \text{sign } x)$ , где  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – собственные частоты колебаний на каждой из структур,  $A$  – амплитуда свободных колебаний на основной структуре.

Необходимо отметить, что  $\omega_2$  может принимать любые значения из допустимой области. Величина же сдвига фокуса будет зависеть от начальных условий ( $x_0, \dot{x}_0$ ) и  $\omega_1$ . Этого можно избежать, организовав первое переключение структуры (точка 1) по линии, заданной уравнением.

$$\dot{x} + f(x) = 0, \quad (2)$$

где  $f(x)$  – функция координаты, которая в общем случае является нелинейной (рис.3).

Для рассматриваемого пневмоэлемента сдвиг устойчивого положения равновесия (фокуса) возможен при отключении дополнительного объема в деформированном состоянии ПЭ. При этом масса газа

$$\Delta Q_1 = \frac{P_{00}V_{00}KX_1}{RT[H_0(1+K) + X_1]}$$

перетечет из основного в дополнительный объем и будет оставаться в нем до второго переключения. В этом выражении  $x_1$  соответствует координате отключения дополнительного объема. Пневмоэлемент при этом увеличит свою жесткость до значения

$$C_1 = C_0 + \frac{P_{00}Sv}{(1+K)(H_0 + X_1)}$$

Уравнение движения РО в рассмотренном случае примет вид

$$\ddot{x} + \frac{P_{00}S}{m} \left\{ 1 - \left( \frac{H_0}{H_0 + X} \right)^v \left[ \frac{(1+K)(H_0 + X_*)}{H_0(1+K) + X_*} \right]^j \right\} = 0, \quad (3)$$

где  $X_* = X$  при  $[\dot{x} + f(x)]x > 0$  (область 1)

$$X_* = X_1 \text{ при } [\dot{x} + f(x)]x \leq 0 \text{ (область 2)} \quad (4)$$

Уравнение (4) задает закон отключения дополнительного объема. Область 1 на фазовой плоскости (рис.3) соответствует подключенному дополнительному объему, а область 2 – отключенному (заштрихован).

Если принять  $j = V$ , (низкочастотные колебания) и линеаризовать восстанавливающую характеристику ПЭ в окрестности  $x = 0$ , то, решая совместно уравнения свободного движения (3) на двух участках, при наложении условия неразрывности траектории изображающей точки на фазовой плоскости и попадании ее на втором участке в окрестность фазового нуля, найдем нелинейную часть уравнения линии переключения (2)

$$f(x) = \frac{s}{H_0} \sqrt{\frac{P_{00}v[H_0(K-1) - X]}{V_{00}m(1+K)(H_0 + X)}} X, \quad (5)$$

На (рис.4) показаны линии переключения для приведенных выше значений параметров. В интервале  $-H_0 < x \leq H_0$  линии не симметричны относительно начала координат и полностью лежат в области действительных значений при  $K > 2$ . Кривизна линий с увеличением  $K$  уменьшается и при  $K \geq 5$  ее (с достаточной точностью) можно аппроксимировать линейной зависимостью:

$$\ddot{x} + \frac{s}{H_0} \sqrt{\frac{P_{00}v[H_0(K-1)]}{V_{00}m(1+K)}} X = 0$$

При дальнейшем увеличении  $K$ :

$$f(x) = \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{s}{H_0} \sqrt{\frac{P_{00}v[H_0(K-1)]}{V_{00}m(1+K)}} X = \frac{s}{H_0} \sqrt{\frac{P_{00}v}{V_{00}m}} X$$

Из выражений (2) и (5) видим, что уравнение линии переключения зависит от параметров пневмоэлемента и от массы РО. В то же время оно инвариантно к скорости позиционирования  $\dot{x}_0$ .

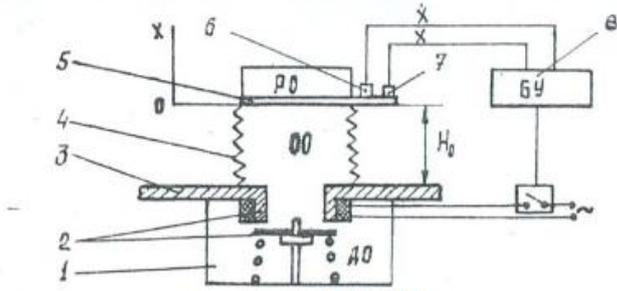


Рисунок 1

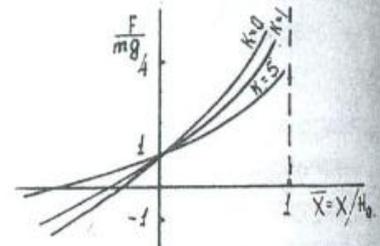


Рисунок 2

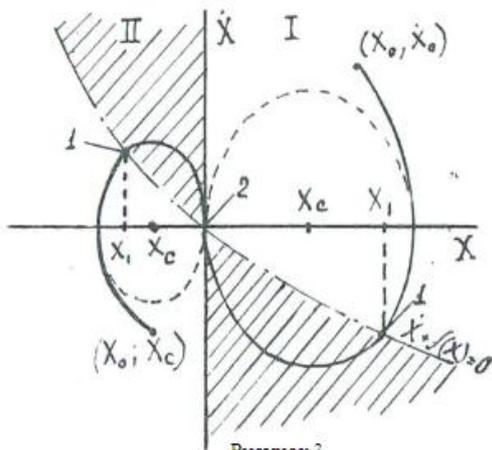


Рисунок 3

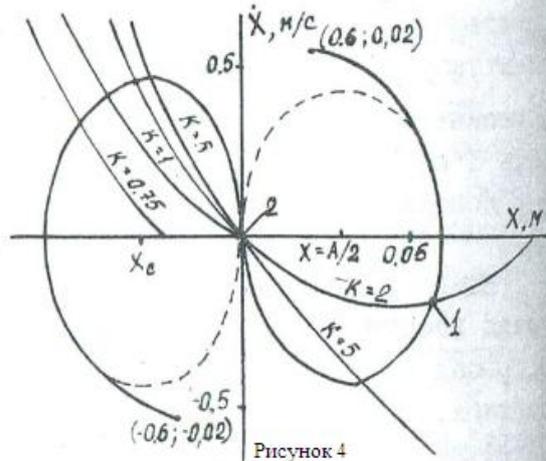


Рисунок 4

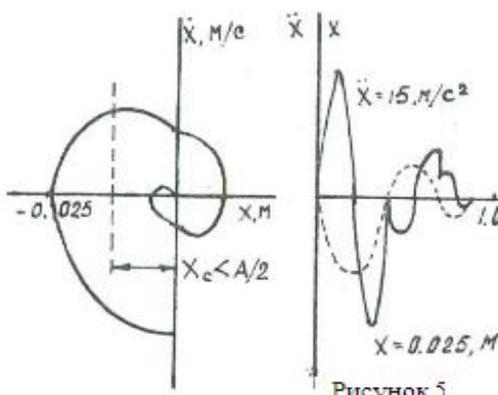


Рисунок 5

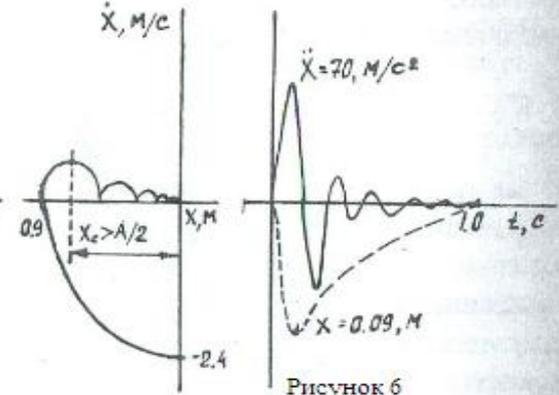


Рисунок 6

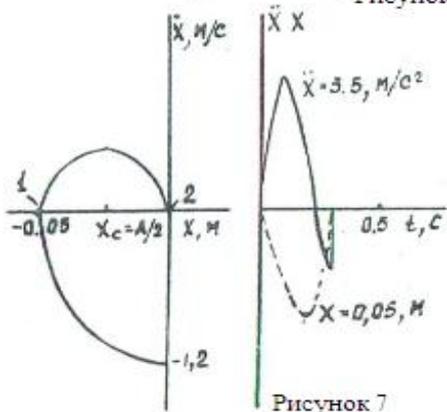


Рисунок 7

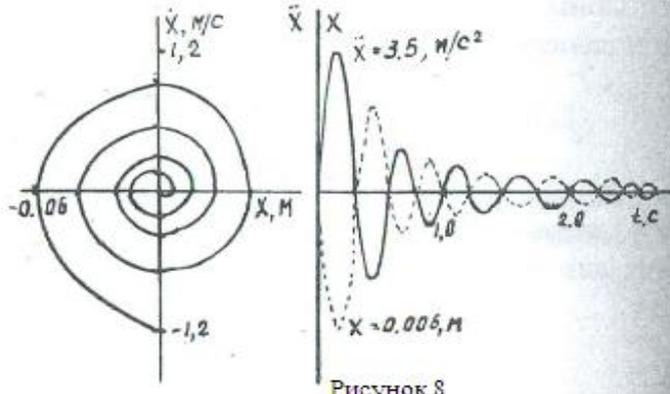


Рисунок 8

Из выражений (3) и (4) можно получить уравнение линии переключения, инвариантное к изменению массы РО

$$x = \sqrt{\frac{H_0(K-1) - x}{kH_0}} \dot{x}_0$$

В этом случае для полупериодного гашения свободных колебаний РО нужно иметь информацию о его скорости позиционирования.

Наиболее просто реализуем закон переключения при  $f(x) = 0$

Уравнение (4)

$$\left\{ \begin{array}{l} x_* = x \text{ при } x\dot{x} > 0, \\ x_* = x_1 \text{ при } x\dot{x} \leq 0, \end{array} \right\} \quad (6)$$

что соответствует переключению структуры по линиям  $x = 0$  и  $x = \dot{x} = 0$ .

На (рис.5,6,7) приведены фазовые траектории и временные характеристики такого режима переключения, полученные численными методами по уравнениям (3), (6). При этом моделировались свободные колебания с начальными скоростями позиционирования РО  $\dot{x}_0 = 0,6 \frac{M}{c}; 1,2 \frac{M}{c}; 2,4 \frac{M}{c}$ .

На (рис.8) для сравнения приведены аналогичные характеристики, полученные ранее (3) при оптимальном демпфировании свободных колебаний за счет дросселирования воздуха в соединительном канале. Вид кривых показывает, что при управлении по алгоритму (6) время затухания свободных колебаний существенно меньше, чем при оптимальном дросселировании.

Таким образом, изменение структуры пневмоэлемента, использованного в качестве упругого упора, по предложенным алгоритмам позволяет осуществлять затухание свободных колебаний РО, близкое к оптимальному по быстродействию.

### Литература

1. Поезжаева Е.В//Теория механизмов и механика систем машин. Промышленные роботы: учеб. пособие: в 3 ч. / Е.В. Поезжаева. – Пермь: Изд-во Перм. Гос. техн. ун-та, 2009.-Ч.2-185.
2. Поезжаева Е.В//Теория механизмов и механика систем машин. Учеб. Пособия/Е.В. Поезжаева.- Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2014.-400
3. Поезжаева Е.В//Теория механизмов и механика систем машин. Промышленные роботы: учеб. пособие: в 3 ч. / Е.В. Поезжаева. – Пермь: Изд-во Перм. Гос. техн. ун-та, 2009.-Ч.3-164.