

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ ДВУХОБЪЕМНОГО ПНЕВМОАМОРТИЗАТОРА

*Построена и исследована модель, описывающая рабочие процессы в двухобъемном пневмоамортизаторе и динамику амортизируемого объекта. Она позволяет провести анализ и выявить основные закономерности и особенности в работе как самих пневмоамортизаторов, так и управляемых клапанных устройств при различных режимах работы пневмоамортизатора.*

*Ключевые слова:* режим работы пневмоамортизатора, кратковременная коммутация объемов, демпфирование колебаний.

Управляемые пневматические виброзащитные устройства могут наиболее полно удовлетворять требованиям систем амортизации (СА) различных амортизируемых объектов (АО), так как обеспечивают регулирование упруго-демпфирующей характеристики (УДХ) и хорошую виброзащиту [1]. В них в качестве рабочего тела используется лишь одна фаза – газ, благодаря чему нет необходимости выполнения отдельных демпфирующих устройств.

В работе предложено и исследовано устройство для демпфирования колебаний объектов – двухобъемный пневмоамортизатор (ПА), в котором демпфирование колебаний объекта осуществляется за счет перетекания массы газа из одного объема ПА в другой и обратно (рис. 1) [2]. Выбор режима работы ПА осуществляется системой управления клапаном ПА (рис. 2) [3]. В зависимости от конструкции клапанных устройств и их настройки ПА могут работать в различных режимах и иметь широкий диапазон упруго-демпфирующих характеристик. В связи с этим возникает необходимость выбора оптимальных режимов работы ПА с коммутацией объемов и описание их рабочих процессов через термодинамические параметры газа в объемах. При этом необходимо получить общие системы дифференциальных уравнений, включающие и уравнения динамики АО, решение которых позволило бы провести соответствующий анализ и выявить основные закономерности и особенности в работе, как самих ПА, так и клапанных устройств.

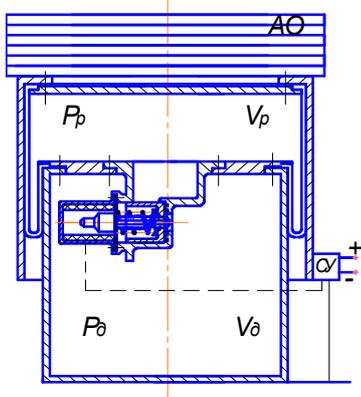


Рис. 1. Двухобъемный пневмоамортизатор

При работе ПА в его объемах периодически находится неодинаковое количество газа. Рабочий объем, как пра-

вило, изменяется во времени и вместе с тем изменяется состояние газа (давление, масса газа в объемах, температура), что приводит к изменению внутренней энергии. Так, например, при сжатии ПА затрачивается подводенная работа  $dL$ , в результате чего увеличивается внутренняя энергия  $dU$ , что вызывает повышение температуры. При повышении температуры некоторое количество тепла  $dQ$  вследствие непрерывного теплообмена передается к стенкам ПА и в окружающую среду, находящихся при более низкой температуре. Это явление незначительно влияет на колебательный процесс АО. На колебательный процесс АО также оказывают влияние силы трения в местах сопрягаемых деталей ПА (резинокордной оболочки и направляющих арматур), силы трения, возникающие вследствие деформации силового корда (каркаса) и в целом оболочки, силы трения в направляющих роликах, шарнирных элементах и т. д. Суммарная сила трения определяется, как правило, опытным путем, то есть при снятии рабочих характеристик ПА без какого-либо демпфирующего устройства и уточняется при свободных колебаниях АО. Экспериментальными исследованиями [4] было установлено, что суммарная сила трения в РКО приблизительно равна  $0,01Mg$  (логарифмический декремент затухания  $\delta = 0,75$ ).

Однако демпфирующая способность ПА за счет теплоотдачи через стенки в окружающую среду и диссипации энергии в РКО недостаточна для интенсивного демпфирования колебаний АО, и здесь требуется постановка специальных гасителей колебаний, обеспечивающих поглощение энергии 50–70 % и более.

При составлении уравнений процессов в ПА примем следующие допущения:

- рабочий газ в ПА подчиняется законам идеальных газов;
- вследствие кратковременности воздействия внешний теплообмен не учитывается и рабочий процесс в ПА считается адиабатическим;
- процессы выравнивания давления в объемах ПА при коммутации объемов происходят мгновенно;
- движение АО осуществляется в вертикальном направлении;
- эффективная площадь ( $S$ ) ПА при движении АО не меняется;
- утечки газа из ПА отсутствуют.

Для определения термодинамических параметров в объемах ПА выделим следующие режимы работы ПА:

– первый режим: происходит процесс выравнивания давления в объемах ПА, при этом давление газа в дополнительном объеме  $P_p$  больше, чем давление газа в рабочем объеме  $P_q$ ;  $P_p > P_q$ , скорость вертикального перемещения  $\dot{z}_0 = 0$ , клапан открыт, происходит истечение газа из дополнительного объема в рабочий объем  $V_q \rightarrow V_p$ ;

– второй режим: ПА в режиме сжатия, клапан закрыт  $\dot{z}_0 < 0$ ;  $P_p > P_q$ ;

– третий режим: происходит процесс выравнивания давления в объемах ПА, при этом  $\dot{z}_0 = 0$ ,  $P_p > P_q$ , клапан открыт, происходит истечение газа из рабочего объема в дополнительный объем  $V_p \rightarrow V_q$ ;

– четвертый режим: ПА в режиме отбоя, клапан закрыт  $\dot{z}_0 > 0$ ,  $P_p < P_q$ .

Построим математическую модель динамики ПА при свободных колебаниях АО, при этом рассмотрим каждый режим работы ПА в отдельности.

При первом режиме в начале хода сжатия осуществляется процесс выравнивания давления в объемах ПА. Истечение газа происходит из дополнительного объема в рабочий объем.

Уравнение первого закона термодинамики данного режима для рабочего объема будет иметь вид

$$dU_p + dL_p = dQ_{\Delta m}, \quad (1)$$

где  $dL_p$  – элементарная работа, совершаемая над газом при сжатии ПА

$$dL_p = P_p dV_p; \quad (2)$$

$dV_p$  – изменение рабочего объема при сжатии ПА;  $dU_p$  – изменение внутренней энергии в объемах ПА

$$dU_p = C_v T_p dm_p + C_v m_p dT_p; \quad (3)$$

$C_v$  – удельная теплоемкость воздуха при постоянном объеме;  $T_p, dT_p$  – температура и изменение температуры воздуха в рабочем объеме;  $m_p, dm_p$  – масса воздуха и ее изменение в рабочем объеме ПА в текущий момент времени;  $dQ_{\Delta m}$  – элементарное количество тепла, вынесенное текущим газом с массой  $dm_{q \rightarrow p}$  из дополнительного объема в рабочий объем

$$dQ_{\Delta m} = C_p T_q dm_{q \rightarrow p};$$

$$T_q = \frac{P_q V_q}{R m_q}; \quad C_p = R \frac{k}{k-1}; \quad C_v = \frac{C_p}{k},$$

где  $C_p$  – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении;  $R$  – газовая постоянная;  $k$  – показатель адиабаты;  $m_q, dm_q$  – масса воздуха и ее изменение в дополнительном объеме ПА в текущий момент времени;  $T_q$  – температура воздуха в дополнительном объеме.

Тогда

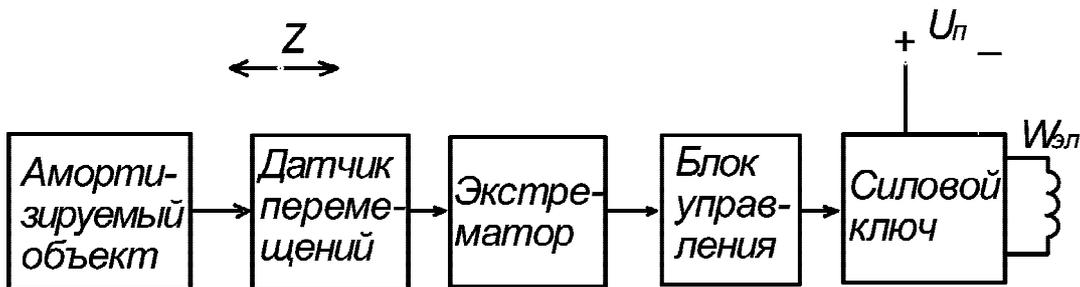


Рис. 2. Система управления импульсным клапаном

$$dQ_{\Delta m} = \frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{P_q V_q}{m_q} dm_{q \rightarrow p}. \quad (4)$$

Из уравнения состояния газа определим  $dT_p$ :

$$dT_p = \frac{P_p dV_p + V_p dP_p - RT_p dm_{p \rightarrow q}}{R m_p},$$

где  $dP_p$  – изменение давления газа в рабочем объеме при сжатии ПА.

Подставив значения  $C_v$  и  $dT_p$  в уравнение (3) и преобразовав его, получим

$$dU_p = \frac{1}{k-1} (P_p dV_p + V_p dP_p). \quad (5)$$

Таким образом, используя полученные выражения (2), (4) и (5), уравнение (1) примет вид

$$\frac{dP_p}{dt} = -\frac{k P_p S_3 \dot{z}_0}{V_{p0} + S_3 z_0} + \frac{k P_q V_q}{V_p m_q} \frac{dm_{q \rightarrow p}}{dt}, \quad (6)$$

где  $S_3$  – эффективная площадь ПА;  $P_{p0}, V_{p0}$  – давление газа в рабочем объеме ПА и его объем при статическом положении АО;  $z_0, \dot{z}_0, \ddot{z}_0$  – относительные перемещение, скорость и ускорение АО.

Уравнение первого закона термодинамики данного режима для дополнительного объема будет иметь вид

$$dU_q + dL_q = -dQ_{\Delta m}.$$

По аналогии

$$dU_q = \frac{1}{k-1} (P_q dV_q + V_q dP_q); \quad dL_q = P_q dV_q,$$

где  $dV_q = 0$ , так как  $V_q = \text{const}$ , следовательно

$$dU_q = \frac{1}{k-1} V_q dP_q; \quad dL_q = 0; \quad dQ_{\Delta m} = \frac{k}{k-1} \frac{P_q V_q}{m_q} dm_{q \rightarrow p}.$$

Таким образом, окончательное уравнение для дополнительного объема примет вид

$$\frac{dP_q}{dt} = -\frac{k P_q}{m_q} \frac{dm_{q \rightarrow p}}{dt}. \quad (7)$$

Из теории истечения газов [5; 6] расход газа через проходное сечение клапана при коммутации объемов выглядит следующим образом:

– при докритическом режиме, когда  $\frac{P_q}{P_p} > 0,528$ :

$$\frac{dm_{p \rightarrow q}}{dt} = \mu F_{\text{кл}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_q m_q}{V_q} \left[ \left( \frac{P_p}{P_q} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]};$$

– при критическом режиме, когда  $\frac{P_q}{P_p} \leq 0,528$ :

$$\frac{dm_{p \rightarrow q}}{dt} = \mu F_{\text{кл}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_q m_q}{V_q} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}}},$$

где  $F_{\text{кл}}$  – площадь проходных сечений клапана;  $\mu$  – коэффициент расхода газа через клапан

или

$$\frac{dm_{q \rightarrow p}}{dt} = \mu F_{\text{кл}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_p m_p}{V_p} \left[\left(\frac{P_q}{P_p}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]}$$

$$\frac{dm_{q \rightarrow p}}{dt} = \mu F_{\text{кл}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_p m_p}{V_p} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}}}. \quad (8)$$

Тогда, с учетом уравнений (6)–(8) система дифференциальных уравнений, описывающая первый режим работы ПА, будет иметь вид

$$\frac{dP_p}{dt} = -\frac{kP_p S_3 \dot{z}_0}{V_{p0} + S_3 z_0} + \frac{kP_q V_q}{V_p m_q} \frac{dm_{q \rightarrow p}}{dt};$$

$$\frac{dP_q}{dt} = -\frac{kP_q}{m_q} \frac{dm_{q \rightarrow p}}{dt};$$

$$\frac{dm_{q \rightarrow p}}{dt} = \mu F_{\text{кл}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_p m_p}{V_p} \left[\left(\frac{P_q}{P_p}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]}$$

при  $\frac{P_q}{P_p} \geq 0,528$ ;

$$\frac{dm_{q \rightarrow p}}{dt} = \mu F_{\text{кл}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_p m_p}{V_p} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}}}$$

при  $\frac{P_q}{P_p} \leq 0,528$ ;

$$V_p = V_{p0} + S_3 Z_0 + V_q; \quad \dot{z}_0 = \frac{dz_0}{dt};$$

$$M\ddot{z} = (P_p - P_a)S_3 - M \cdot g - R_{\Sigma}(\text{sign } \dot{z}_0) - \ddot{z}_n(t). \quad (9)$$

$z_n, \dot{z}_n, \ddot{z}_n$  – абсолютные перемещения, скорость и ускорение основания ПА;  $M$  – масса амортизированного объекта;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $R_{\Sigma}$  – сила трения, зависящая от скорости движения АО.

При втором режиме работы ПА клапан закрыт.

Система дифференциальных уравнений, описывающая второй режим работы ПА, имеет вид

$$\frac{dP_p}{dt} = -\frac{kP_p S_3 \dot{z}_0}{V_{p0} + S_3 z_0}; \quad \dot{z}_0 = \frac{dz_0}{dt};$$

$$M\ddot{z} = (P_p - P_a)S_3 - Mg - R_{\Sigma}(\text{sign } \dot{z}_0) - \ddot{z}_n(t), \quad (10)$$

где  $P_a$  – атмосферное давление.

При третьем режиме происходит процесс выравнивания давления в объемах ПА, при этом  $\dot{z}_0 = 0, P_p > P_q$ , клапан открыт, истечение газа происходит из  $V_p \rightarrow V_q$ .

Система дифференциальных уравнений, описывающая режим работы ПА, имеет вид

$$\frac{dP_p}{dt} = -\frac{kP_p S_3 \dot{z}_0}{V_{p0} + S_3 z_0} + \frac{kP_p}{m_p} \frac{dm_{p \rightarrow q}}{dt};$$

$$\frac{dP_q}{dt} = \frac{kP_p V_p}{m_p V_q} \frac{dm_{p \rightarrow q}}{dt};$$

$dm_{p \rightarrow q}$  – масса газа, перенесенная из рабочего объема в дополнительный объем, рассчитывается следующим образом:

$$\frac{dm_{p \rightarrow q}}{dt} = \mu F_{\text{кл}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_p m_p}{V_p} \left[\left(\frac{P_p}{P_q}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right]}$$

при  $\frac{P_q}{P_p} \geq 0,528$ ;

$$\frac{dm_{p \rightarrow q}}{dt} = \mu F_{\text{кл}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_p m_p}{V_p} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}}}$$

при  $\frac{P_q}{P_p} \leq 0,528$ ;

$$V_p = V_{p0} + S_3 Z_0 + V_q; \quad \dot{z}_0 = \frac{dz_0}{dt};$$

$$M\ddot{z} = (P_p - P_a)S_3 - Mg - R_{\Sigma}(\text{sign } \dot{z}_0) - \ddot{z}_n(t). \quad (11)$$

При четвертом режиме ПА находится в режиме отбоя, клапан закрыт  $\dot{z}_0 > 0, P_p < P_q$ :

$$\frac{dP_p}{dt} = -\frac{kP_p S_3 \dot{z}_0}{V_{p0} + S_3 z_0}; \quad \dot{z}_0 = \frac{dz_0}{dt};$$

$$M\ddot{z} = (P_p - P_a)S_3 - M \cdot g - R_{\Sigma}(\text{sign } \dot{z}_0) - \ddot{z}_n(t). \quad (12)$$

При дальнейшей работе ПА все термогазодинамические процессы в объемах ПА повторяются.

Исследования динамики ПА проводились для следующих исходных данных ПА и АО:

- масса АО равна  $M = 75\,000$  кг;
- средний диаметр резинокордной оболочки  $d_{\text{ср}} = 0,575$  м;
- эффективная площадь ПА  $S_{\text{эф}} = \frac{\pi \cdot d^2 - p^2}{4} = 0,26$  м<sup>2</sup>;
- температура в начале хода сжатия  $T = 308$  °К;
- давление в рабочем объеме в статическом положении

$$P_{\text{р0}} = \frac{M \cdot 10}{S_{\text{эф}}} = 2,888 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

– суммарный объем ПА в статическом положении  $V_0 = 0,63$  м<sup>3</sup>;

– дополнительный объем ПА в статическом положении

$$\text{или } V_{q0} = \frac{V_0}{2} = 0,315 \text{ м}^3;$$

– рабочий объем ПА в статическом положении

$$V_{\text{р0}} = V_0 - V_{q0} = 0,315 \text{ м}^3;$$

– суммарная масса газа в рабочем и дополнительном объемах ПА в статическом положении  $m_{\text{сум}} = \frac{P_{\text{р0}} \cdot V_0}{R \cdot T \cdot 10} = 2,058$  кг;

– в исходном положении ПА поднята на высоту  $Z_0 = 0,365$  м;

– рабочий объем ПА в исходном положении

$$V_p = V_{\text{р0}} + Z \cdot S_{\text{эф}} = 0,41 \text{ м}^3;$$

– давление в рабочем объеме в исходном положении

$$P_p = \frac{P_{\text{р0}} \cdot V_0}{V_p + V_q} = 2,511 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

– давление в дополнительном объеме в исходном положении  $P_d = P_p = 2,511 \cdot 10^6$  Па;

– масса газа в рабочем объеме в исходном положении

$$\text{или } m_p = \frac{m_{\text{сум}} \cdot V_p}{V_p + V_q} = 1,164 \text{ кг};$$

- масса газа в дополнительном объеме в исходном положении  $m_q = m_{\text{сум}} - m_p = 0,895$  кг;
- начальная скорость  $v_0(Z_0) = 0$  м/с;
- прочие параметры  $R = 287$  Дж/(кг · °К);  $\mu = 0,7$ ;  $k = 1,41$ .

Расчет динамики проводился, начиная с исходного положения АО (рис. 3, уровень «1»), свободные колебания АО затухали около статического положения АО (рис. 3, уровень «0»). По результатам расчета динамики ПА с электроклапаном построены графики свободных колебаний различных параметров АО (рис. 4–6). На графиках параметр  $\beta^* = \frac{V_q}{V_{po}}$  – отношение объемов ПА при статическом положении АО ( $\beta^* = 1 \div 3$ ).

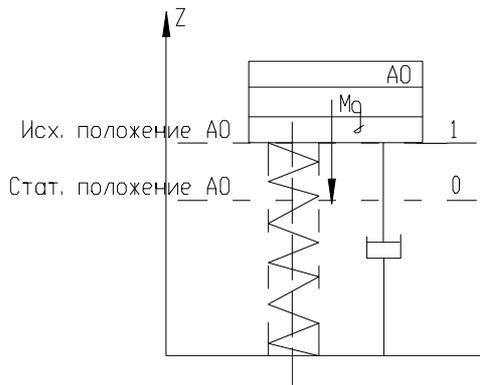


Рис. 3. Расчетная схема динамики ПА

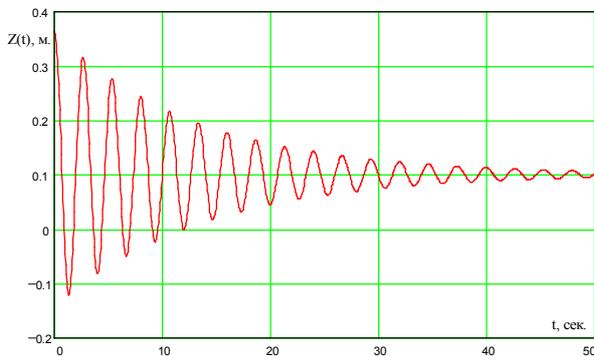


Рис. 4. График изменения координаты  $Z(t)$  при отключенном электроклапане

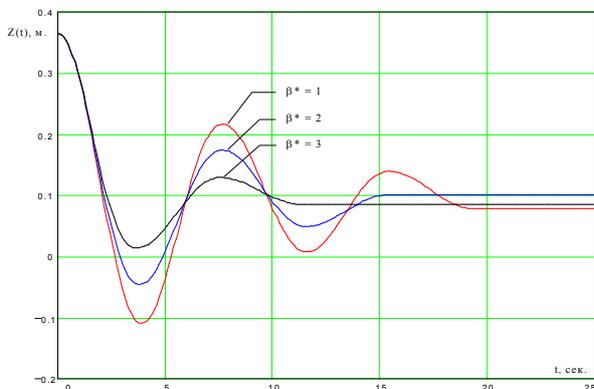


Рис. 5. График изменения координаты  $Z(t)$

Проведенные теоретические исследования (см. рис. 4, 5) показали, что ПА обеспечивает интенсивное демпфиро-

вание свободных колебаний. Кривые свободных колебаний позволили также установить, что при демпфировании при включении электроклапана при работе ПА время затухания колебаний АО снизилось (с 40 с при отключенном электроклапане до 10...15 с при включенном электроклапане при различных значениях параметра  $\beta^*$ ), наибольшее демпфирование ПА имеет за первый период колебаний. Также демпфирование колебаний возрастает с увеличением значения параметра  $\beta^*$ .

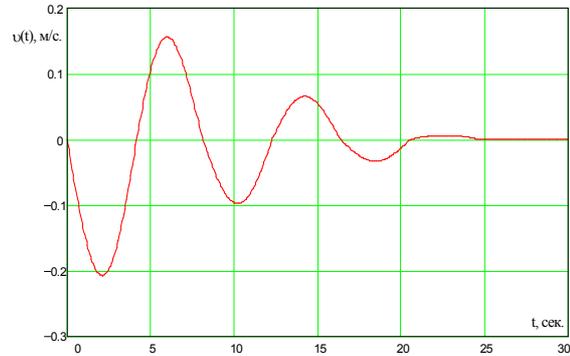


Рис. 6. График изменения скорости  $v(t)$  (при  $\beta^* = 1$ ) при различных значениях параметра  $\beta^*$

По результатам теоретических исследований строится УДХ ПА (рис. 7). Поглощенная энергия колебаний АО за один цикл отражается площадью петли гистерезиса на УДХ. За счет выбираемого алгоритма работы системы управления клапана можно получить петлю гистерезиса с ее различным расположением относительно статической характеристики ПА (рис. 7, а (кривая а–б) или рис. 7, б (кривая а–с)).

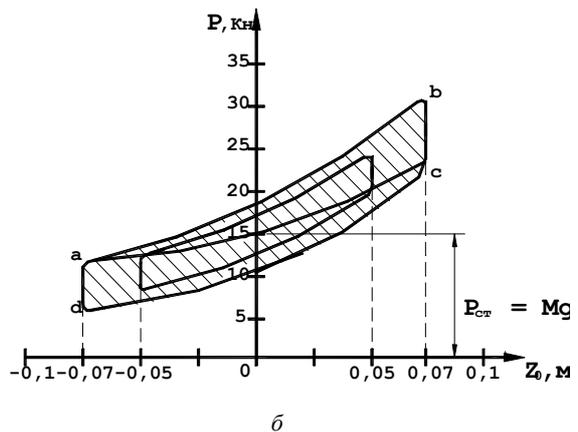
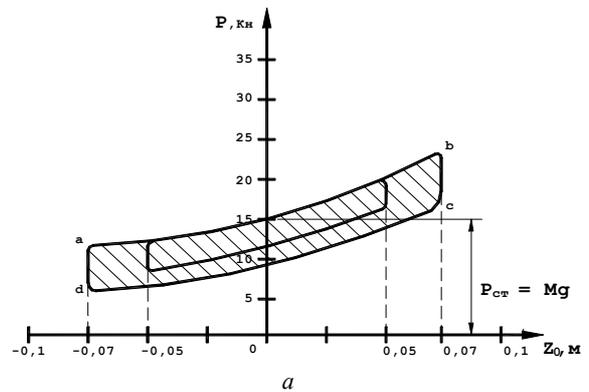


Рис. 7. Упругодемпфирующая характеристика ПА

Таким образом, предложенный управляемый двухобъемный ПА с электроклапаном в перегородке обеспечивает резкое улучшение демпфирующих свойств колебательной системы, регулирование упругодемпфирующих характеристик и одновременно хорошую виброударозащиту различных объектов, в том числе крупногабаритных объектов, транспортных средств, технологического оборудования. Полученная модель, описывающая рабочие процессы ПА и динамику АО, позволяет провести анализ и выявить основные закономерности работы ПА.

#### Библиографические ссылки

1. Аверьянов Г. С., Зензин Ю. А., Белицкий В. Д. Рабочий цикл пневматического амортизатора с активным управлением термодинамическими параметрами газа //

Динамика машин и рабочих процессов : межвуз. сб. науч. тр. Челябинск, 1985. С. 144–149.

2. Патент на изобретение № 2325285 Российская Федерация, М.Кл. F 16 F 9/04, В 60 G 11/26. Пневматическая подвеска / Аверьянов Г. С., Хамитов Р. Н. Оpubл. 27.05.2008, Бюл. № 15.

3. Хамитов Р. Н. Синтез системы управления импульсным электродинамическим клапаном пневмоамортизатора // Справочник. Инженерный журнал. 2008. № 2. С. 62–64.

4. Новоженин А. А., Фитилев Б. Н. Экспериментальные исследования постоянной демпфирования ПА с РКО // Динамика систем : межвуз. сб. науч. тр. Омск, 1975. Вып. 2. С. 71–75.

5. Дмитриев Г. Д., Градецкий В. Г. Основы пневматики. М. : Машиностроение, 1973.

6. Ястржембский А. С. Техническая термодинамика. М. : ГЭИ, 1960.

R. N. Khamitov

### CONTROL SYSTEM AND PROCESSES OF TWO-VOLUME PNEUMOSHOCK-ABSORBER

*The model describing working processes in the two-volume pneumoshock-absorber and dynamics of the damped object is constructed and investigated. The model allows to carry out the analysis and to reveal the basic laws and features in work, both pneumoshock-absorbers, and operated valves at various operating modes of the pneumoshock-absorber.*

*Keywords: pneumoshock-absorber operating mode, short-term switching of volumes, damping of fluctuations.*

© Хамитов Р. Н., 2010

УДК 629.735.064

А. А. Прейс

### СРАВНЕНИЕ МЕТОДИК РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ САМОЛЕТОВ ГОСУДАРСТВЕННОЙ АВИАЦИИ

*Выполнены сравнительные исследования расчетных значений показателей надежности систем самолетов. Показано, что традиционная методика расчета неадекватно оценивает изменения надежности по наработке. Использование методики расчета вероятности отказа через 1 час полета по альтернативной методике устраняет отмеченное несоответствие, свойственное традиционной методике.*

*Ключевые слова: традиционная методика, альтернативная методика, системы самолетов, государственная авиация.*

Проектирование авиационной техники с высокой степенью надежности является одной из основных проблем современности. Эта проблема имеет особенное значение, так как надежность напрямую связана с безопасностью полетов, материальными затратами и эффективностью ее использования. В то же время повышение эффективности самолетов как гражданской, так и государственной авиации, за счет роста интенсивности использования и снижения затрат на эксплуатацию, в последние годы обеспечивалось значительным усложнением конструкции функциональных систем и бортового оборудования.

Усложнение самолета можно наглядно проследить на примере роста количества и элементов электронной аппаратуры бомбардировщиков фирмы Боинг. Если на самолетах В-17 и В-29 применялось оборудование, состоящее из 1 000–2 000 элементов, то на самолете В-58 количество элементов возросло до 95 000, а на сверхзвуковом стратегическом бомбардировщике В-70 использовалось оборудование, насчитывающее 150 000 элементов [1; 2].

По данным периодических изданий, следствием усложнения основных компонентов и систем явилось снижение эксплуатационных характеристик новых боевых