

УДК 62-752.2

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГАСИТЕЛЯ КОЛЕБАНИЙ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫХ МАНОМЕТРОВ**© 2012 А. Г. Гимадиев<sup>1</sup>, А. А. Гимадиев<sup>2</sup>, А. З. Ермошкин<sup>2</sup>, В. Н. Илюхин<sup>1</sup><sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет)<sup>2</sup>ООО Научно-производственное предприятие «Гималаи»

Разработан гаситель колебаний давления для электроконтактных манометров (ЭКМ), позволяющий измерять наибольшее (наименьшее) значения пульсирующего давления при сохранении быстродействия измерительной цепи. Теоретическими и экспериментальными исследованиями гасителя в составе ЭКМ на гидравлическом оборудовании подтверждена заданная его эффективность.

*Электроконтактный манометр, пульсации давления, гаситель колебаний, динамические характеристики, эффективность гасителя.*

Одной из важных задач, возникающих при эксплуатации систем смазки опор электрических генераторов, гидравлического оборудования, топливных систем и других установок, является обеспечение надёжного срабатывания систем защиты от превышения сверх допустимой нормы или сброса давления. Чувствительным элементом таких систем во многих случаях является ЭКМ, формирующий сигнал для выключения агрегатов или подключения резервных источников давления. Давление в гидравлических системах наряду со средним значением содержит пульсационную составляющую, обусловленную неравномерной подачей насосов, неустойчивой работой агрегатов и другими причинами. Пульсации давления часто приводят к ложному срабатыванию ЭКМ. Применение традиционных гасителей в виде дросселей, акустических РС – фильтров [1-3] позволяет снизить уровень пульсаций давления в полости манометра, однако при этом происходит также запаздывание в передаче сигнала, причём оно тем больше, чем выше эффективность гасителя. Запаздывание в срабатывании ЭКМ может привести к аварийным ситуа-

циям, особенно при превышении давления в системах выше допустимого уровня.

В работе исследуется демпфирующее устройство (гаситель) [4] для ЭКМ, состоящий из байпасно соединённых обратного клапана и гидравлического дросселя (рис. 1). Обратный клапан может устанавливаться на режим накачки (рис. 1,а) или откачки (рис. 1,б) давления. При первой схеме установки манометр будет показывать наибольшее значение из реализующегося пульсирующего давления, то есть их «верхушки», а при второй установке – нижний край колебательного процесса.

Гаситель колебаний с накачкой применяется в ЭКМ для сигнализации превышения давления, а откачки – для сигнализации сброса давления в системе. Однако широкое применение гасителей для ЭКМ сдерживается отсутствием методик их расчёта и недостаточным исследованием их характеристик. В статье предлагается решение этих задач.

При расчёте гасителя предполагается, что источником давления, к напорной магистрали которого подключён манометр с гасителем, является плунжерный или шестерённый насос.

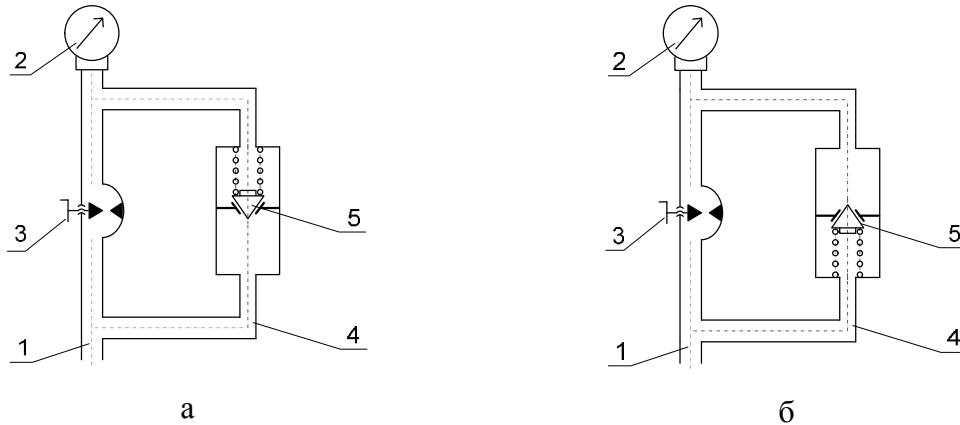


Рис. 1. Принципиальные схемы гасителя колебаний давления для электроконтактных манометров (а – для случая накачки давления; б – для случая откачки давления); 1 – импульсная трубка; 2 – электроконтактный манометр; 3 – дроссель; 4 – байпасный канал; 5 – обратный клапан

Давление в гидравлической системе в общем случае описывается зависимостью

$$P_{zc}(t) = P_{zc0} + \sum_{r=1}^{r=R} A_{zc}^{(r)} \sin(\omega_r t + j_r), \quad (1)$$

где  $P_{zc0}$  - постоянная составляющая давления;  $A_{zc}^{(r)}$ ,  $\omega_r$ ,  $j_r$  - амплитуда, частота и начальная фаза  $r$ -ой составляющей колебаний давления соответственно;  $t$  - время.

Одноплунжерный гидравлический насос-дозатор является источником колебаний расхода, который создаёт в гидравлической системе давление, которое можно приближенно аппроксимировать формулой

$$P_{zc}(t) = \begin{cases} P_{zc0} & \text{при } 0 < y < j, \\ P_{zc0} + A_{zc} \sin y & \text{при } (p-j) \leq y \leq 2p, \end{cases} \quad (2)$$

где  $A_{zc}$  - амплитуда колебаний давления;  $j = \arcsin(P_{zc0}/A_{zc})$ ;  $y = \omega t$ ;  $\omega = 2\pi f$ ;  $f$  - циклическая частота.

В системе защиты с ЭКМ подводящий или импульсный трубопровод по длине выбирают как можно короче. Поэтому на передачу колебаний давления от гидравлической системы к манометру он не оказывает существенного влияния. Для упрощения расчётов предположим, что

ЭКМ с гасителем подсоединён непосредственно к трубопроводу гидравлической системы.

При выводе уравнения обратного клапана гасителя предположим, что инерционные силы, действующие на него, малы по сравнению с силой от перепада давления. При перепаде давления выше противодавления со стороны пружины клапан мгновенно занимает открытое положение и наоборот. Движение жидкости через клапан турбулентное, квазистационарное. При таких допущениях обратный клапан можно описать зависимостью:

$$Q_{кл} = \begin{cases} (mF)_{кл} \sqrt{2\Delta P / r} & \text{при } \Delta P > \Delta P_{np}; \\ 0 & \text{при } \Delta P \leq \Delta P_{np} \end{cases} \quad (3)$$

для гасителя с накачкой давления ( $\Delta P_{np} > 0$ );

$$Q_{кл} = \begin{cases} (mF)_{кл} \sqrt{2\Delta P / r} & \text{при } \Delta P < \Delta P_{np}; \\ 0 & \text{при } \Delta P \geq \Delta P_{np} \end{cases} \quad (4)$$

для гасителя со сбросом давления ( $\Delta P < \Delta P_{np}$ ).

Здесь  $Q_{кл}$  - объёмный расход жидкости через клапан;  $(mF)_{кл}$  - эффективная площадь проходного сечения клапана в открытом положении;  $r$  - плотность рабочей среды;  $\Delta P$  - перепад давления на

клапане;  $\Delta P_{np}$  - противодействие со стороны предварительно поджатой пружины.

В качестве дроселирующего элемента в гасителях колебаний давления применяют регулируемые и нерегулируемые гидравлические дроссели, капиллярные трубки. Расход  $Q_o$  и перепад давления  $\Delta P$  в них связаны зависимостями:

$$Q_o = (mF)_o \sqrt{2\Delta P / r} \quad (5)$$

для нелинейного гидравлического дросселя и

$$L_{кан} \frac{dQ_{кан}}{dt} + k_{кан} Q_{кан} = \Delta P \quad (6)$$

для капиллярного канала.

Здесь  $Q_o$ ,  $Q_{кан}$  - объёмный расход жидкости через гидравлический дроссель и капиллярный канал;  $(mF)_o$  - эффективная площадь проходного сечения гидравлического дросселя;  $L_{кан} = r l_{кан} / F_{кан}$  - акустическая индуктивность капиллярной трубки;  $l_{кан}$ ,  $F_{кан}$  - длина и площадь проходного сечения капиллярной трубки соответственно;  $k_{кан} = 128 r n l_{кан} / (p d_{кан}^4)$  - гидравлическое сопротивление капиллярной трубки диаметром  $d_{кан}$ ;  $n$  - кинематическая вязкость жидкости.

Объёмный расход жидкости с выхода байпасно соединённого обратного клапана и дроселирующего элемента в виде нелинейного дросселя ( $Q_{оэ} = Q_o$ ) или капиллярного канала ( $Q_{оэ} = Q_{кан}$ ) равен расходу жидкости в рабочую полость гасителя и манометра  $Q_m$ :

$$Q_m = Q_{кл} + Q_{оэ} \quad (7)$$

Расход жидкости  $Q_m$ , затрачиваемый на создание давления  $P_m$  в полостях гасителя и манометра, определяется по зависимости

$$Q_m = \frac{V_{np}}{rc^2} \frac{dP_m}{dt} \quad (8)$$

где  $V_{np}$  - суммарный приведённый объём полости гасителя и манометра;  $c$  - скорость распространения звука в жидкости.

При пульсирующем давлении на входе в гаситель (1) давление в полости манометра  $P_m(t)$  в общем случае будет также пульсирующим:

$$P_m(t) = P_{m0} + \sum_{n=1}^{n=N} A_{pm}^{(n)} \sin(\omega_n t + g_n), \quad (9)$$

где  $P_{m0}$  - постоянная составляющая давления в полости манометра;  $A_{pm}^{(n)}$ ,  $\omega_n$ ,  $g_n$  - амплитуда, частота и начальная фаза  $n$ -ой составляющей колебаний давления, соответственно.

Для случая полигармонического колебательного процесса в источнике эффективность гасителя колебаний давления оценивается по отношению среднеквадратичного или эффективного значения давлений в источнике и в рабочей полости манометра

$$K_{эф} = \frac{P_{zc}^{(эф)}}{P_m^{(эф)}}, \quad (10)$$

где  $P_{zc}^{(эф)} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{r=1}^{r=R} [A_{zc}^{(r)}]^2}$  - эффективное значение колебаний давления в источнике;

$P_m^{(эф)} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{n=1}^{n=N} [A_m^{(n)}]^2}$  - эффективное значение колебаний давления в полости манометра.

Если источником давления является одноплунжерный насос, то эффективное значение колебаний давления в источнике и рабочей полости манометра следует определять по зависимостям:

$$P_{zc}^{(эф)} = \sqrt{\frac{1}{T_u} \int_0^{T_u} \frac{1}{2} [P_{zc}(t) - P_{zc0}]^2 dt};$$

$$P_m^{(эф)} = \sqrt{\frac{1}{T_u} \int_0^{T_u} \frac{1}{2} [P_m(t) - P_{m0}]^2 dt}, \quad (11)$$

где  $T_u$  - время интегрирования колебательного процесса.

При разработке гасителя для ЭКМ, в первую очередь, следует оценивать эффективность  $K_{эф}$ , от величины которого зависит исключение ложного срабатывания манометра и, во вторую очередь, – насколько будет отличаться постоянная составляющая  $P_{м0}$  от  $P_{с0}$ . При резком изменении давления в источнике по тем или иным причинам время нарастания (спада) давления в полости ЭКМ будет зависеть от площади проходного сечения обратного клапана гасителя и приведённого объема полости манометра. Так как площадь проходного сечения обратного клапана велика по сравнению с сечением дроселирующего элемента, то время, за которое давление в полости манометра достигнет изменённого значения в источнике, будет несущественным. При этом настройку уровня сигнализации ЭКМ следует производить по наибольшему значению пульсирующего давления, на-

блюдающегося в гидравлической системе для гасителя с накачкой или по его наименьшему значению - для гасителя с откачкой.

Теоретическое исследование эффективности гасителя в измерительной цепи с ЭКМ проводилось на основании принятой математической модели цепи, представленной уравнениями (1) – (11). Наличие в измерительной цепи существенно нелинейного элемента (обратного клапана) не позволяет решать уравнения аналитически. Поэтому целесообразно воспользоваться численными методами, реализованными в стандартном пакете программы моделирования Simulink [5]. Для этого необходимо составить модели элементов первого уровня (в соответствии с приведёнными уравнениями), затем объединить их в систему верхнего уровня (рис. 2) и моделировать процессы в измерительной цепи с заданием соответствующих параметров элементов и входного сигнала от источника колебаний давления.

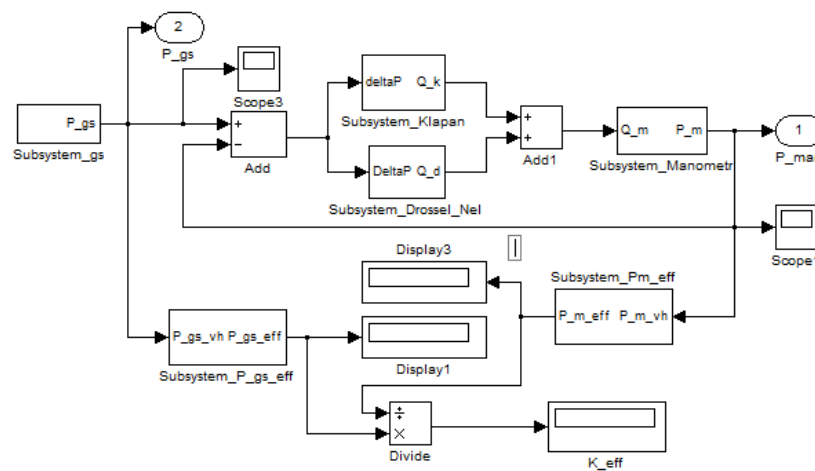


Рис. 2. Модель верхнего уровня в пакете Simulink измерительной цепи с электроконтактным манометром, на входе которого установлен гаситель колебаний давления

Рассмотрим эффективность гасителя колебаний давления с накачкой в измерительной цепи с ЭКМ, подключённой к источнику колебаний в виде одноплунжерного насоса, как создающего наибольший уровень пульсаций. В результате моделирования рабочего процесса в измерительной цепи и на выходе из насоса (рис. 3) стало ясно, что установка гасителя приво-

дит к демпфированию колебаний давления в полости манометра более чем в 10 раз, или эффективность гасителя, определённая по среднеквадратическим значениям, равна  $K_{эф}=11,6$ . Максимальные значения давления в источнике давления и в полости манометра отличаются не более чем на 0,05 МПа, при этом время выхода на это значение в полости манометра

составляет 0,12 с, что вполне допустимо для срабатывания ЭКМ и защиты системы от превышения давления.

Если бы применялся обычный РС – гаситель с тем же гидравлическим дросселем или с той же эффективностью, то максимальное значение давления в полости манометра было бы достигнуто только через 10 с, что не удовлетворило бы требованиям по его быстродействию.

Эффективность гасителя зависит в основном от приведённого объема манометра и гидравлического сопротивления дросселя (рис. 4). Чем выше частота колебаний давления, тем выше эффективность гасителя.

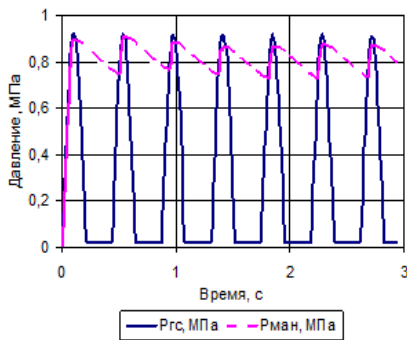


Рис. 3. Оциллограммы изменения давления на выходе из насоса (а) и в рабочей полости манометра (б), полученные в результате моделирования рабочего процесса в измерительной цепи в пакете Simulink:  $f = 2,3$  Гц,  $P_{zс0} = 0$  МПа,  $A_{zс} = 1,14$  МПа,  $c = 1250$  м/с,  $r = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $V_{np} = 0,013$  м<sup>3</sup>,  $(mF)_d = 0,075e-6$  (Па с)/м<sup>3</sup>,  $\Delta P_{np} = 0,05$  МПа

Экспериментальное исследование эффективности действия гасителя проводилось на установке с одноплунжерным гидравлическим насосом-дозатором (рис. 5). Рабочая среда – техническая вода с температурой не более 40 °С, давление на входе в магистраль до 4,0 МПа. Вода, отбираемая самотёком из бака, подаётся плунжерным насосом под высоким давлением на вход в магистраль с дросселем-имитатором гидравлической системы. Давление в магистрали устанавливалось краном К2, вмонтированным в сливную магистраль.

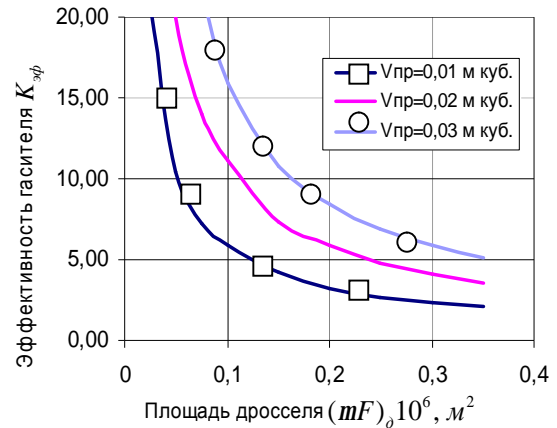


Рис. 4. Зависимость эффективности действия гасителя колебаний давления  $K_{эф}$  от площади проходного сечения дросселя  $(mF)_d$  при амплитуде колебаний давления на входе в манометр  $A_{zс} = 1,0$  МПа с частотой 2,3 Гц и различных приведённых объёмах рабочей полости ЭКМ

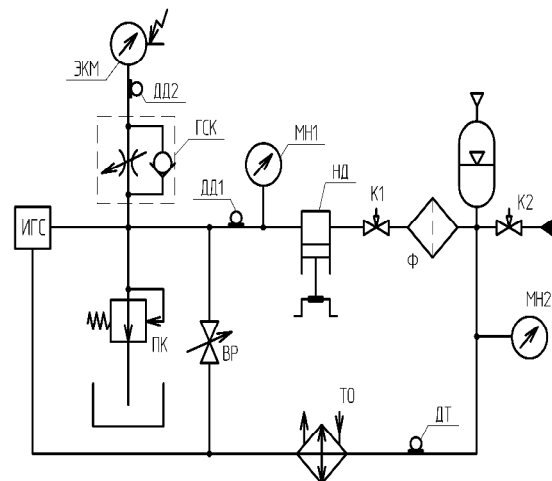


Рис. 5. Гидравлическая схема установки для испытаний эффективности действия гасителя колебаний давления для ЭКМ: ИГС – имитатор контролируемой гидравлической системы; ЭКМ – электроконтактный манометр; ДД1, ДД2 – датчики давления жидкости; ГСК – гаситель колебаний давления в виде байпасно соединённых обратного клапана и регулируемого гидравлического дросселя; МН1, МН2 – технические манометры; К1, К2 – кран перекрывной; Ф – фильтр; ДТ – датчик температуры; ТО – теплообменник

Во время испытаний были использованы датчики давления ЛХ415/40. Один из датчиков давления устанавливался в напорной магистрали (на входе в гаситель), а второй – на выходе из гасителя, т.е. практически в рабочей полости манометра.

метра. Сигнал с выхода датчиков подавался на аппаратуру 4АНЧ-22.

Усиленный сигнал поступал на вход в АЦП с частотой опроса 1 кГц. Обработка сигнала производилась с использованием разработанной в ООО НПП «Гималаи» программы обработки сигналов POVS, позволяющей производить спектральный анализ временных реализаций и определять их эффективные значения.

Анализ эффективности гасителя ГСК60-ВдЭН производства ООО НПП «Гималаи», принципиальная схема которого дана на рис. 1,а, показал, что на выходе из насоса-дозатора реализуется предельное значение давления 1,15 МПа (11,5 кгс/см<sup>2</sup>) и минимальное 0 МПа (0 кгс/см<sup>2</sup>) (рис. 6).

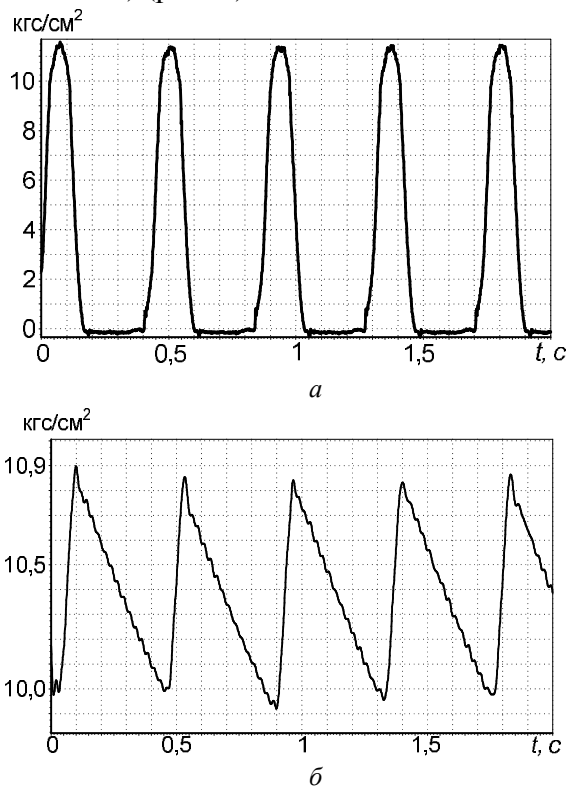


Рис. 6. Осциллограмма давления в месте установки датчика ДД1 на выходе из насоса-дозатора (а) и датчика ДД2 (б) на выходе из гасителя ГСК60ВдЭН (в полости манометра) при максимальной подаче насоса

По показаниям датчика ДД2 наибольшее давление на выходе из гасителя или в полости манометра составило 1,08 МПа (10,8 кгс/см<sup>2</sup>), а минимальное значение составило 0,99 МПа (9,9 кгс/см<sup>2</sup>). Отличие в показаниях предельного значения

манометра и в напорной магистрали равно 0,065 МПа (0,65 кгс/см<sup>2</sup>). При этом эффективность гасителя, определённая по среднеквадратическим значениям, составила  $K_{эф} = 8,6$ . Анализ осциллограммы давления в рабочей полости ЭКМ (рис. 6) показывает, что время нарастания давления в полости манометра меньше, чем время спада, в пять раз. Такой результат подтверждает теоретические зависимости, полученные для тех же условий реализации колебательного процесса в измерительной магистрали (рис. 3).

Таким образом, теоретическими и экспериментальными исследованиями подтверждена работоспособность гасителя для ЭКМ – гасить колебания давления с требуемой эффективностью при сохранении быстродействия прибора. Получены зависимости, по которым можно определить гидравлическое сопротивление гасителя по заданной его эффективности.

Благодарность: Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы», выполняемой в рамках мероприятия 1.9 - 1 очередь «Работы по проведению проблемно-ориентированных поисковых исследований и созданию научно-технического задела по приоритетному направлению «Энергетика и энергосбережение» с участием научных и исследовательских организаций стран Европейского Союза».

### Библиографический список

1. 900141 СССР, М. Кл.3 01 19/06. Демпфирующее устройство для манометрических приборов [Текст] / Г. И. Берестнев, А. Г. Гимадиев, В. П. Шорин (СССР). - № 2936094/18-10; Заявл. 29.05.80; Оpubл. 23.01.82, Бюл. № 3.
2. 1435971 СССР, Кл. 01 19/06. Демпфирующее устройство для манометрических приборов [Текст] / Г. И. Берестнев, А. Г. Гимадиев, Л. М. Лапчук, В. П.

Шорин (СССР). - №4141057/24-10; Заявл. 29.10.86; Опубл. 07.11.88, Бюл. №41.

3. Шорин, В. П. Демпфирование колебаний рабочей среды в манометрических магистралях [Текст] / В. П. Шорин, А. Г. Гимадиев, Г. И. Берестнев // Вибрационная прочность и надёжность двигателей и систем летательных аппаратов: Сб. науч. тр. / Куйбышев, авиац. ин-т. - Куйбышев, 1976. - Вып.3. - С. 134 - 140.

4. Гимадиев, А. А. Демпфирующее устройство для электроконтактных манометров [Текст] / А. А. Гимадиев, А. Г. Гимадиев, А. З. Ермошкин, В. Н. Илюхин – Патент РФ на полезную модель №55127 от 06.02.2006 г.

5. Лазарев, Ю. Ф. MatLAB 5.x [Текст] / Ю. Ф. Лазарев – К.: Издательская группа ВHV, - 2000. – 384 с.

## DESIGN AND RESEARCH OF CHARACTERISTICS OF A PRESSURE FLUCTUATION DAMPING DEVICE FOR ELECTROCONTACT MANOMETERS

© 2012 A. G. Gimadiev<sup>1</sup>, A. A. Gimadiev<sup>2</sup>, A. Z. Ermochkin<sup>2</sup>, V. N. Ilyuchin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University  
named after academician S. P. Korolyov (National Research University)

<sup>2</sup>The Gimalai ltd

A shock absorber for electric contact manometers (ECM) has been developed which makes it possible to measure the greatest (smallest) values of pulsating pressure while maintaining the speed of the measuring circuit. Theoretical and experimental analysis of the shock absorber incorporated into an ECM of hydraulic equipment confirmed its preset efficiency.

*Electric contact pressure gauge, pressure pulsation, shock absorber, dynamic characteristics, efficiency.*

### Информация об авторах

**Гимадиев Асгат Гатятович**, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [gimadiev\\_ag@mail.ru](mailto:gimadiev_ag@mail.ru). Область научных интересов: динамика пневмогидравлических и топливных систем энергетических установок.

**Гимадиев Азат Асгатович**, директор ООО НПП «Гималаи». E-mail: [gaa@gimalai.com](mailto:gaa@gimalai.com). Область научных интересов: разработка и изготовление гидравлической и газовой арматуры технологического оборудования.

**Ермошкин Алексей Золяевич**, ведущий инженер ООО НПП «Гималаи». E-mail: [eraz@gimalai.com](mailto:eraz@gimalai.com). Область научных интересов: разработка и изготовление гидравлической и газовой арматуры технологического оборудования.

**Илюхин Владимир Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [iwnik@yandex.ru](mailto:iwnik@yandex.ru). Область научных интересов: мехатроника и робототехника.

**Gimadiev Asgat Gatyatovich**, Ph.D., professor, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [gimadiev\\_ag@mail.ru](mailto:gimadiev_ag@mail.ru). Area of research: pneumohydraulic and power plant fuel system dynamics.

**Gimadiev Azat Asgatovich**, the Gimalai ltd., CEO. E-mail: [gaa@gimalai.com](mailto:gaa@gimalai.com). Area of research: hydraulic and gas production equipment design and manufacture.

**Ermoshkin Alex Zolyaevich**, the Gimalai ltd., chief engineer. E-mail: [eraz@gimalai.com](mailto:eraz@gimalai.com). Area of research: hydraulic and gas production equipment design and manufacture.

**Ilyukhin Vladimir Nikolayevich**, Ph.D., associate professor, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: [iwnik@yandex.ru](mailto:iwnik@yandex.ru). Area of research: mechatronics and robotics.