

На правах рукописи

Емельянова Оксана Викторовна

**ДИНАМИКА НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ КЛАПАНА
ПРЕЦИЗИОННОГО ДОЗАТОРА ЖИДКИХ СРЕД**

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Курск 2011

Работа выполнена на кафедре теоретической механики и мехатроники Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Юго-Западный государственный университет", г.Курск.

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор,
Яцун Сергей Федорович

Официальные оппоненты: Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор,
Колодёжнов Владимир Николаевич

Доктор технических наук, профессор
Соломин Олег Вячеславович

Ведущая организация: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет — учебно-научно-производственный комплекс» (ОрелГТУ)

Защита состоится "29" июня 2011 года в 10⁰⁰ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.105.01 при Юго-Западном государственном университете по адресу: 305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, д.94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго-Западного государственного университета.

Автореферат разослан "27" мая 2011 г.

Ученый секретарь совета
по защите докторских и кандидатских
диссертаций Д 212.105.01
кандидат технических наук, доцент

Б.В.Лушников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в технике широкое распространение получили различные дозирующие устройства, предназначенные для отмеривания и выдачи заданного количества жидкости в виде порций. Современный этап развития такой техники характеризуется повышением требований к точности, надежности, быстродействию аппаратуры, а также возможности автоматизации процесса дозирования и поддержания пропускной способности особенно, когда речь идет о микро- или нанопорциях.

Дозирование представляет собой сложный процесс, связанный с нестационарными режимами открытия и закрытия исполнительного устройства дозатора, быстротой изменения динамических параметров, таких как скорость и ускорение движения исполнительного устройства, которые могут быть значительными и влиять на точность и стабильность дозирования.

В настоящее время, как в отечественной промышленности, так и за рубежом, проблема повышения точности дозирования решается путем значительного усложнения конструкции и применения дорогостоящих прецизионных элементов. Одним из путей повышения точности и быстродействия импульсных систем дозирования является разработка и исследование дозаторов нового типа, основанных на контроле и управлении движением исполнительных элементов.

В то же время отсутствие методики расчета динамических процессов и недостаточная проработка методов повышения точности дозирования в таких устройствах существенно сдерживают их дальнейшее распространение.

Прецизионные дозаторы можно отнести к вибрационным и виброударным системам, исследование динамики которых основывается на работах В.И. Бабицкого, В.Н. Баранова, И.И. Блехмана, Р.Ф. Ганиева, А.М. Гуськова, В.Л. Крупенина, Я.Г. Пановко, М.З. Коловского, Ю.И. Неймарка, А.Е. Кобринского, Я.А. Вибы, С.Л. Цыфанского, Г.Я. Пановко, С.Ф. Яцуна и др. Вопросам дозирования посвящены работы М.В. Соколова, А.Л. Гуревича, Ю.Д. Видинеева, В.Г. Цейтлина и др. Эти работы легли в основу построения математического аппарата, применяемого при проектировании современных дозаторов.

Необходимость разработки методов математического моделирования движения исполнительного элемента определила актуальность исследований динамики управляемого движения исполнительного устройства прецизионного дозатора. Поэтому в данной работе исследуются динамические процессы, протекающие в сложной электрогидромеханической системе, в которую входят исполнительные устройства дозатора, электрические приводы, блок управления, дозируемая жидкость и система автоматического управления (САУ), обеспечивающая заданное движение исполнительного звена.

Цель работы – повышение точности прецизионных импульсных дозаторов как электрогидромеханических систем, основанное на выявлении закономерностей функционирования и создании инструментальных средств расчета управляемых нестационарных режимов движения исполнительного элемента.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи**:

1. Изучение природы возникновения погрешностей процесса дозирования с помощью интегральной ошибки, включающей погрешности механической, электрической и гидравлической систем, и оценка их влияния на точность дозирования.

2. Разработка математической модели движения исполнительного устройства дозатора золотникового типа с учетом сил взаимодействия золотника, жидкости и корпуса, их влияния на погрешность механической системы; изучение динамических режимов движения золотника, обеспечивающих периодическое движение без остановок.

3. Разработка математической модели движения исполнительного устройства клапанного типа с учетом привода ограниченной мощности и кусочно-линейной силы упругости, позволяющей описать процесс взаимодействия клапана с седлом; оценка погрешностей, возникающих в электрической системе и системе управления.

4. Моделирование нестационарного движения жидкости в канале дозатора с целью определения погрешности в гидравлической системе.

5. Разработка системы автоматического управления движением клапана исполнительного устройства прецизионного дозатора в зависимости от величины отклонения реальной траектории движения от заданной.

6. Разработка стенда для исследования динамических эффектов, возникающих при работе прецизионного дозатора, экспериментальные исследования, анализ и сравнение полученных данных.

7. Разработка инструментальных средств проектирования и расчета прецизионных дозаторов клапанного типа на базе блочного имитационного моделирования и методики создания функциональной диагностики качественного состояния дозаторов.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы использованы основные положения теоретической механики, теории нелинейных колебаний, автоматического управления, механики сплошных сред, теории пограничного слоя, методов математического моделирования, численных методов решения дифференциальных уравнений, оптимизации с применением генетических алгоритмов.

Достоверность научных положений и результатов обеспечена корректностью постановки задачи, обоснованностью использованных теоретических зависимостей и принятых допущений, применением известных математических методов; подтверждается адекватностью математических моделей, сравнительным анализом результатов, полученных при научном обосновании и в результате экспериментальных исследований.

Научная новизна и положения, выносимые на защиту:

1. Разработана математическая модель движения исполнительного устройства золотникового типа с учетом упруго-вязких свойств уплотнительного кольца и сил сухого трения. Установлено, что сила сухого трения пропорциональна статической деформации уплотнительного кольца. Предложена карта динамических режимов движения золотника дозатора в плоскости параметров приведенных коэффициентов сухого трения и амплитуды вынуждающей силы, позволившая установить наличие режимов движения золотника без остановок и с остановками.

2. Разработана математическая модель движения исполнительного устройства клапанного типа, описывающая динамические процессы, протекающие в электрогидромеханической системе с учетом привода ограниченной мощности и кусочно-линейной модели силы упругости, изменяющей свои свойства вследствие образования загрязнений на седле клапана. Анализ результатов моделирования

позволил создать новый тип дозатора, обеспечивающий точность дозирования до 93 % при условии контроля за положением клапана дозатора по критерию минимизации интегральной ошибки перемещения.

3. Предложена математическая модель течения жидкости в цилиндрическом канале дозатора на основе уравнений несжимаемости вязкой жидкости и теории пограничного слоя и получена аналитическая зависимость, связывающая мгновенный расход жидкости с параметрами дозирующей системы. Установлено, что погрешность, вызванная свойствами гидравлической системы, экспоненциально уменьшается с ростом времени открытия дозатора.

4. Теоретически и экспериментально подтверждена и обоснована зависимость между загрязнением клапана дозатора и падением давления в топливной магистрали на основе спектрального анализа виброграмм, позволяющая использовать эту информацию в качестве диагностического признака и дать количественную оценку степени загрязнения электромагнитных форсунок.

5. Установлена, что точность дозирования определяется погрешностями механической, электрической и гидравлической системами, причем ошибка механической системы связана со статической деформацией уплотнительного кольца. Погрешность электрической системы и системы управления связана с запаздыванием системы открытия клапана дозатора из-за наличия ЭДС самоиндукции электромагнитного привода. Гидравлическая погрешность зависит от длительности управляющего импульса, поступающего на обмотку электромагнита, вязкости жидкости, её инерциальных свойств и параметров дозатора.

Практическая ценность данной работы состоит в том, что её результаты могут использоваться при проектировании прецизионных дозаторов нового типа за счет создания системы управления движением клапана дозатора и управления им в зависимости от величины отклонения от заданной траектории, что позволит повысить точность системы автоматического дозирования.

Кроме того, в результате исследований предложены экспериментальная установка и программное обеспечение, позволяющие проводить диагностику дозирующих устройств, в частности, электромагнитных форсунок, для оценки степени их загрязненности по спектральному анализу временных диаграмм, а также осуществлять их диагностику на дихотомическом уровне («годен-негоден»).

Результаты работы внедрены в производственный процесс ООО «Автолига Сервис» (Курск), внедрены в технологию выполнения текущих и внеплановых ремонтов транспортных средств Федеральной противопожарной службы России по Курской области, в учебный процесс кафедры теоретической механики и мехатроники Юго-Западного государственного университета по специальности 220401.65 «Мехатроника», а также *использованы при выполнении государственных контрактов П2114 от 05.11.2009 г., П1576 от 10.10.2009 г. в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 г.».*

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на XI Российской научно-технической конференции «Материалы и упрочняющие технологии – 2004» (Курск, 2004), на VII-IX Международных научно-технических конференциях «Вибрационные машины и технологии» (Курск, 2005, 2008, 2010), Всероссийской научно-методической конференции «Основы проектирования и детали машин – XXI век»

(Орел, 2007), научно-методической конференции «Образование через науку» (Курск, 2008), VIII научной конференции «Нелинейные колебания механических систем» (Н. Новгород, 2008), Международной конференции «Управление динамическими системами» (Москва, 2009), 11-й Международной научно-практической конференции «Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня» (С.-Петербург, 2009), XVI Международной научно-практической конференции «Современная техника и технологии» СТТ-2011 (Томск, 2011).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 научных работ, из них 5 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 3 патента на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 115 наименования и 2 приложений. Основной текст изложен на 195 страницах и содержит 113 рисунков и 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, сформулированы цели и основные задачи работы, определена научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения работы, выносимые на защиту.

В первой главе дается краткий обзор и анализ способов дозирования, исследовано современное состояние вопроса в области микродозирования как комплексное решение задач регулирования и управления малыми объемами жидкостей до 10^{-9} м^3 . Приведена классификация систем дозирования, рассмотрены способы управления исполнительным устройством системы дозирования, построенные на импульсном принципе за счет колебаний распределительного устройства, находящегося в непосредственном контакте с дозируемой жидкостью.

Проведен обзор математических моделей дозаторов и дозируемых сред, рассмотрена технология процесса дозирования и даны основные определения прецизионности дозирования. Сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе рассматриваются вопросы моделирования динамики движения исполнительного устройства электромагнитного дозатора с программным управлением.

Функциональная схема прецизионного дозатора представлена на рисунке 1.

Оценка точности проводится с помощью интегральной ошибки $\eta = \sum_{i=1}^n \eta_i$,

которая зависит от погрешностей механической системы η_1 , электрической системы и системы управления η_2 , а также погрешностью η_3 гидравлической системы, связанной с физико-механическими свойствами жидкости и системы дозирования.

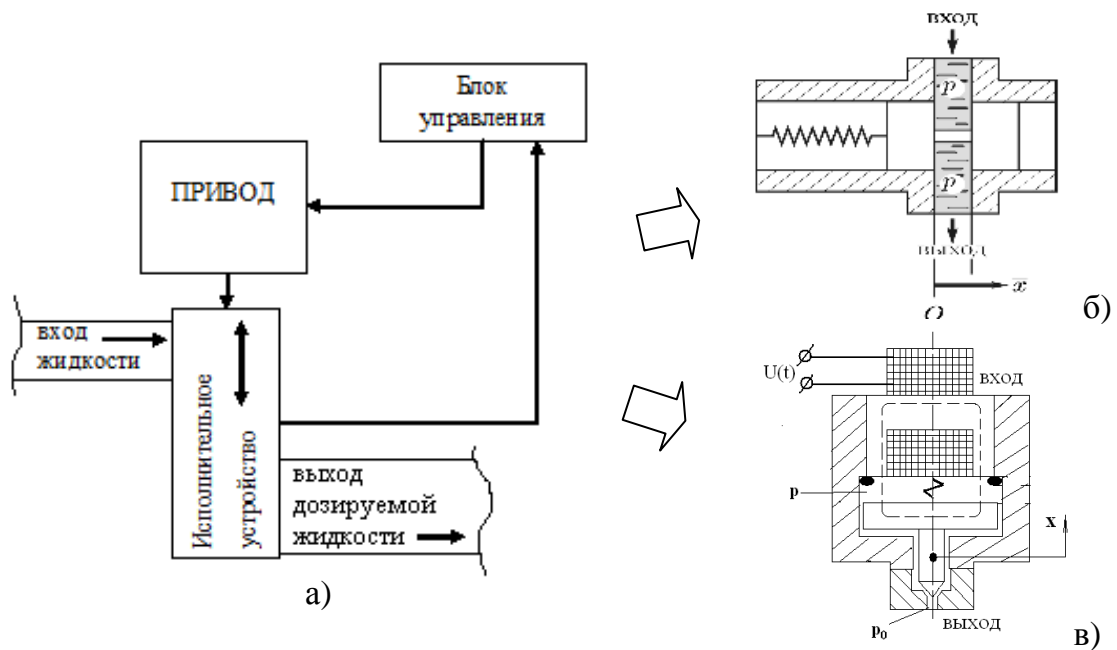


Рис. 1. Функциональная схема прецизионного дозатора (а), дозатор с золотниковым (б) и клапанным (б) распределительными устройствами; p , p_0 – область высокого и низкого давления соответственно

На первом этапе рассмотрено периодическое движение золотникового распределительного элемента дозатора, расчетная схема которого представлена на рисунке 2. Такой дозатор отличается простотой конструкции, однако возникает необходимость герметизации контактной зоны движения между золотником и корпусом дозатора уплотнительным кольцом манжеты, которая обеспечивает нулевой радиальный зазор и плотную посадку золотника в цилиндре. Однако это приводит к увеличению силы сухого трения за счет радиальной деформации уплотнительного кольца, которое моделируется в виде вязкоупругих элементов с приведенной жесткостью c_1 и коэффициентом вязкости μ_1 (рис. 2, б).

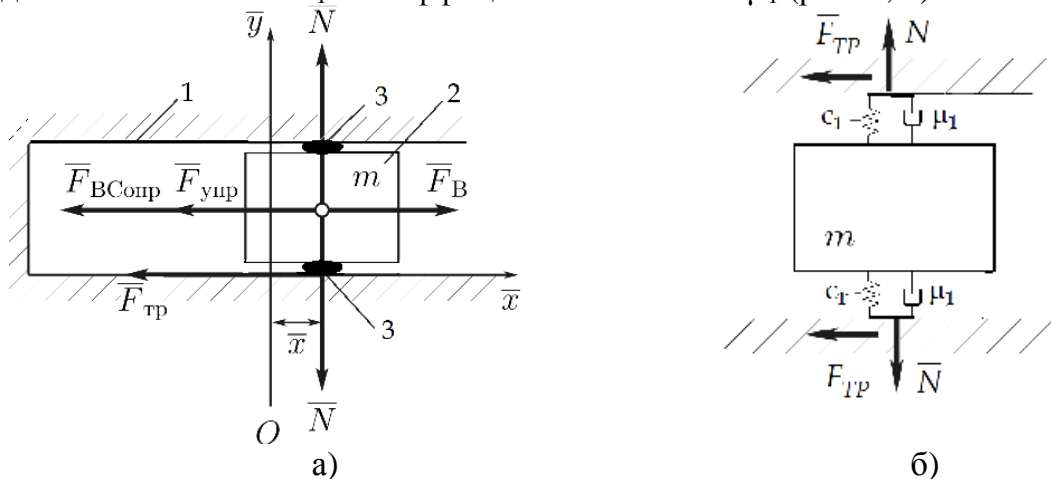


Рис. 2. Расчетная схема дозатора жидких сред: а – расчетная схема движения золотника в корпусе; б – модель уплотнения кольца манжеты; 1 – корпус дозатора; 2 – золотник; 3 – уплотнительная манжета; N – сила нормального давления уплотнения кольца манжеты; $F_{тр} = F_c \operatorname{sign} \dot{x}$ – приведенная сила сухого трения; $F_{ВСопр}$ – сила вязкого сопротивления; $F_{упр}$ – сила упругости; F_B – вынуждающая сила

Для записи уравнений движения поршня дозатора введем неподвижную систему координат $O\bar{x}\bar{y}$, жестко связанную с корпусом дозатора. За начало отсчета примем точку O , совпадающую с положением статического равновесия поршня, определяемого без учета сил сухого трения.

Дифференциальные уравнения, описывающие движение системы в безразмерной форме имеют вид:

$$\ddot{x} = -\alpha x - \mu \dot{x} + \gamma_m \sin \tau - f \operatorname{sign}(\dot{x}); \quad (1)$$

$$f_0 = \alpha x + \gamma_m \sin \tau, \quad \dot{x} = 0, \quad -f < f_0 < f, \quad (2)$$

где $+f$, $-f$, f_0 – приведенные значения коэффициента трения в положительном, отрицательном направлениях движения и в положении покоя соответственно;

$\tau = \omega t$, $x = \frac{\bar{x}}{x_0}$ – безразмерные время и перемещение; параметры $\mu = \frac{\bar{\mu}}{m\omega}$, $\alpha = \frac{c}{m\omega^2}$,

$f = \frac{F_c}{mx_0\omega^2}$, $\gamma_m = \frac{F_{B0}}{mx_0\omega^2}$, где x_0 – масштаб длины.

Обозначим $x_1 = x$, $x_2 = \dot{x}$ и перепишем уравнения (1) и (2) в векторной форме:

$$\dot{X} = G_-(\tau, X) + \frac{1}{2} \Delta G(\tau, X) [1 + \operatorname{sign}(\xi(X))], \quad \Delta G(\tau, X) = G_+(\tau, X) - G_-(\tau, X), \quad (3)$$

где $X = (x_1, x_2)^T$; $G_{\pm} = (g_{1\pm}, g_{2\pm})^T$, $g_{1\pm} = x_2$, $g_{2\pm} = -\alpha x_1 - \mu x_2 + \gamma_m \sin \tau \mp f$, $\xi(X) = x_2$.

Для выяснения возможных типов динамического поведения рассматриваемой системы выполним построение С-бифуркационных границ.

Фазовое пространство (τ, X) динамической системы (3) разделяется на два подпространства: D_+ , где $\xi(X) > 0$, и D_- , где $\xi(X) < 0$.

В подпространстве D_+ , D_- уравнение движения (3) имеет вид

$$\dot{X} = G_{\pm}(\tau, X) \quad (4)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -\alpha x_1 - \mu x_2 + \gamma_m \sin \tau \pm f. \end{cases} \quad (5)$$

Границей указанных подпространств является плоскость S , определяемая уравнением $\xi(X) = 0$, которая состоит из областей S_+ , S_- и S_0 . Здесь S_+ – часть S , с которой фазовая точка уходит в область D_+ , а S_- – та часть S , с которой фазовая точка уходит в D_- . Если же с обеих сторон от границы S фазовые траектории направлены к S , то оказавшись на участке $S_0 \subset S$ фазовая точка не может сойти с S ни в область D_+ , ни в область D_- . Движение по S_0 будем называть *областью движения с остановками*. Уравнение движения на S_0 записывается $\ddot{x} = \dot{x} = 0$. Сила трения при этом изменяется между своими предельными значениями.

В динамической системе (5) возможны различные типы периодических движений. На рисунке 3 приведена двухпараметрическая диаграмма, рассчитанная в плоскости параметров сил сухого трения f и амплитуды вынуждающей силы γ_m , приводящих к появлению зон движений золотника без остановок, с остановками и при критическом значении параметров – зоны отсутствия движения на траектории периодического движения, которые могут приводить к потере контроля за исполнительным устройством и, как следствие, к изменению положения статического равновесия, что существенно влияет на точность дозирования.

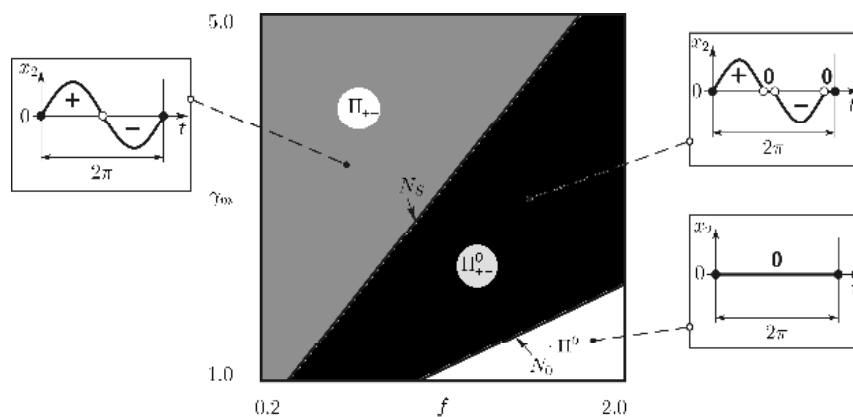


Рис. 3. Карта динамических режимов: область Π_{+-} отвечает области периодических движений клапана без остановок; Π_{+-}^0 – режиму колебаний с остановками; Π^0 – отсутствуют колебания клапана, т.е. дозирующая система не работает

Исследования показали, что точность таких дозаторов может снижаться, а погрешность η_1 достигать 100%. Поэтому в последнее время большее распространение получили системы прецизионного дозирования клапанного типа, т.к. они лишены такого недостатка, как наличие областей движения с остановками. Исполнительное устройство такого дозатора находится в жидкости, которая служит смазочным слоем между клапаном и корпусом дозатора и сводит к минимуму негативное воздействие силы сухого трения. В конечном итоге этой силой можно пренебречь.

Рассмотрим движение запирающего клапана дозатора с электромагнитным приводом (рис. 4). Подвижная масса 1 совершает поступательное движение под действием силы F_3 – управляющего электромагнита 2, кусочно-линейной силы упругости $P(x)$, возникающей за счет действия пружины 3 вязкоупругой модели седла клапана 4 и упругого ограничителя 5, и силы вязкого сопротивления $R(x) = \mu \dot{x}$, вызванной наличием гидравлического сопротивления жидкой среды. За обобщенную координату x возьмем перемещение массы m , причем за начало отсчета возьмем точку касания запирающей иглы седла клапана. Между упругими ограничителями 4 и 5 существует воздушный зазор δ , а между ограничителем 4 и электромагнитом – зазор h .

В процессе эксплуатации на седле клапана возможно появление твердых отложений, моделируемых в виде вязкоупругих элементов с параметрами жесткости c_1 и коэффициентом демпфирования μ_2 . Загрязнения могут быть вызваны физико-химическими свойствами дозируемых сред, в результате чего изменяется характер взаимодействия клапана и седла (рис. 5).

На рисунке 6 представлена схема определения силы предварительного сжатия пружины $P_{\text{предв}} = cx_{\text{ст}}$, необходимой для прижатия иглы клапана к седлу и обеспечивающей герметичность дозатора. На основании представленной модели седла клапана и рассчитанных параметров c , c_1 , c_2 , μ_2 (рис. 7) в работе предложена кусочно-линейная сила упругости, возникающая при взаимодействии клапана седла и упругих элементов:

$$P(x) = \begin{cases} (c_1 + c)x - c_1 \cdot x_0 & \text{при } x < x_0; \\ (x - \delta)c + P_{\text{предв}} & \text{при } x_0 \leq x \leq \delta; \\ (c_2 + c)x + (c_1 + c)x_0 + P_{\text{предв}} + c(\delta - x_0) & \text{при } x > \delta, \end{cases} \quad (6)$$

где $P_{\text{предв}}$ – сила упругости при $x=x_0$; δ – рабочий зазор клапана; c – коэффициент жесткости пружины; c_1, c_2 – параметры вязкоупругих ограничителей, $x_0=x_0(t)$ – начальное положение клапана в момент времени $t=0$, зависящее от уровня загрязнения, выработки седла клапана.

При идеально чистой, гладкой металлической поверхности седла клапана $x_0(t)=0$. При наличии отложений на седле происходит смещение положения силы упругости $P_{\text{предв}}$ на величину x_0 и изменение формы кусочно-линейной силы упругости.

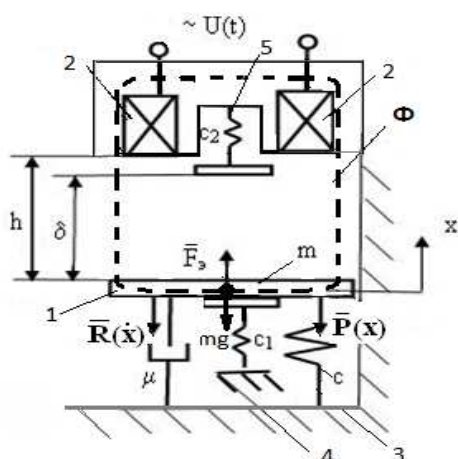


Рис.4. Расчетная схема дозатора: 1 – клапан; 2 – электромагниты; 3 – возвратная пружина; 4 – седло клапана; 5 – верхний ограничитель

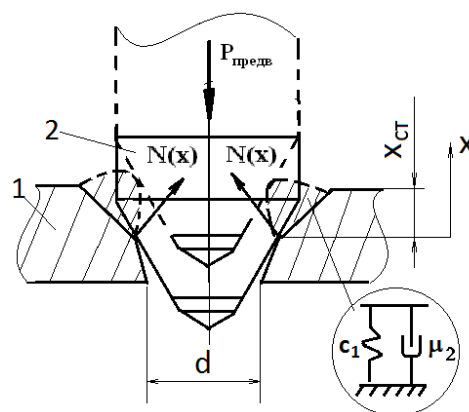


Рис.5. Схема взаимодействия клапана и деформируемого седла: 1 – седло клапана; 2 – клапан конусного типа; 3 – загрязнение; — положение без загрязнений; при наличии загрязнений

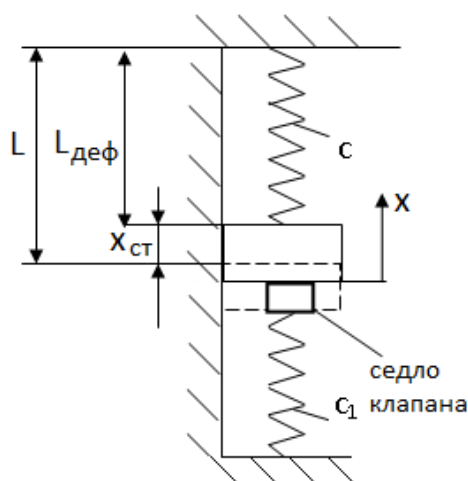


Рис.6. Расчетная схема определения силы упругости $P_{\text{предв}}$

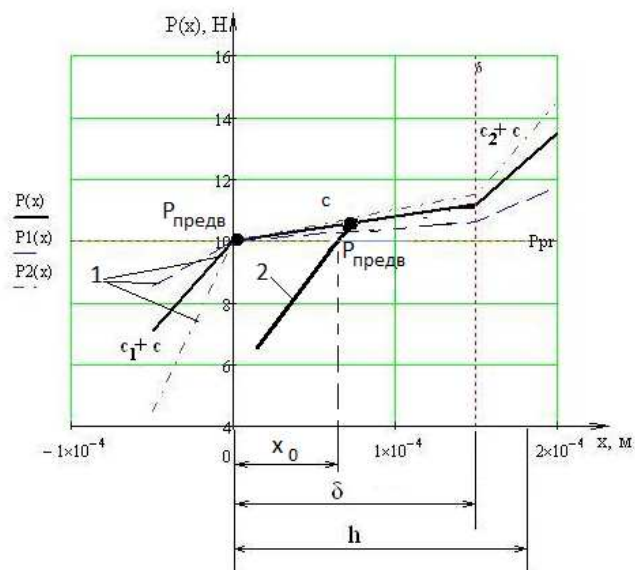


Рис.7. График зависимости силы упругости $P(x)$ от обобщенной координаты x в зависимости от различных коэффициентов жесткости: 1 – без загрязнений; 2 – с учетом загрязнений

Для описания динамических процессов, протекающих в рассматриваемой системе, на основе уравнений Лагранжа-Максвелла записаны соответствующие нелинейные дифференциальные уравнения, которые в безразмерной форме имеют вид:

$$\begin{cases} \ddot{\bar{x}} + \xi \dot{\bar{x}} + \psi \bar{x} - 1 = \chi \bar{\Phi}^2; \\ \dot{\bar{\Phi}} + \beta \bar{\Phi} = \varepsilon \bar{U}(\tau), \end{cases} \quad (7)$$

$\tau = \omega t$; $x = x_0 \bar{x}$; $\dot{x} = x_0 \omega \dot{\bar{x}}$; $\ddot{x} = x_0 \omega^2 \ddot{\bar{x}}$; $\Phi = \Phi_0 \bar{\Phi}$; $\dot{U}(t) = U_0 \dot{\bar{U}}$; $g = x_0 \omega^2$; τ – безразмерное время; x_0 – масштаб длины; U_0 – масштаб электрического напряжения; Φ_0 – масштаб потока. Переменные с чертой являются безразмерными.

Интегральную ошибку электропривода и системы управления η_2 , определяемые управляющим напряжением $U(t) = (U_0, t_0, t_{oc}, t_3)$, где U_0 – максимальное значение управляющего напряжения, t_0 , t_{oc} , t_3 – время открытия, открытого состояния и закрытия клапана дозатора, вычислим по формуле:

$$\eta_2 = \frac{\left| \int_0^{T^*} x^* dt - \int_0^T x dt \right|}{\int_0^{T^*} x^* dt} = \frac{\left| \sum_{i=n}^n x_i^* - \sum_{j=m}^m x_j \right|}{\sum_{i=n}^n x_i^*}, \quad (8)$$

где x^* , x – теоретический и реальный законы движения; $n = T^* / \Delta t$, $m = T / \Delta t$ – коэффициенты, равные соответственно отношению теоретического и реального времени дозирования к разнице между ними.

При программном управлении задающее воздействие $U(t)$ эквивалентно $x^*(t)$, управляющее напряжение $U(\Delta x) = k \Delta x = k(x^*(t) - x(t))$, где k – коэффициент регулятора.

В работе исследовались следующие формы управляющих импульсов, подаваемые на обмотку электромагнита (рис. 8): косинусоидальная, синусоидальная, прямоугольная, а также ступенчатая прямоугольная. Моделирование проводилось в среде MATLAB/Simulink численным методом Bogacki-Shampine с адаптивным шагом интегрирования. На рисунке 8 представлены результаты моделирования движения иглы клапана дозатора.

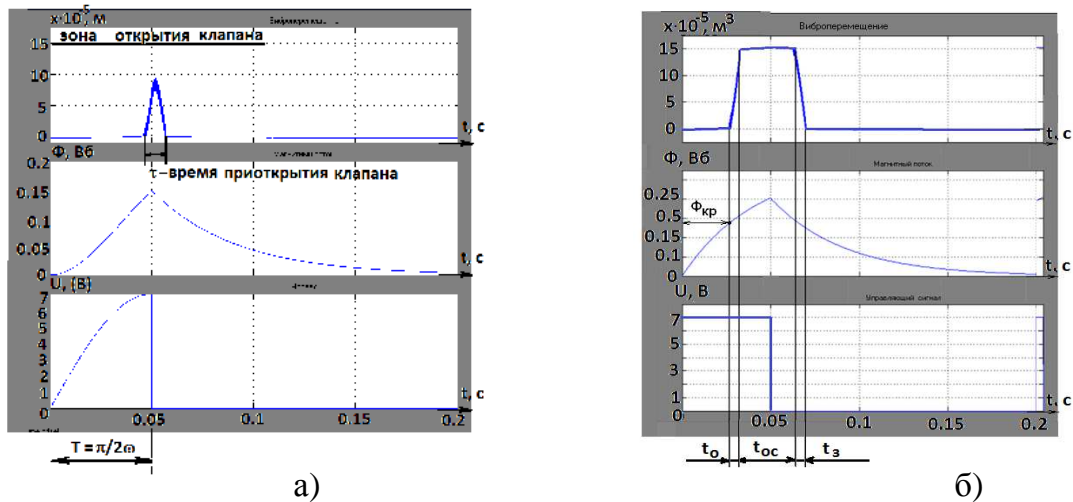


Рис. 8. Графики перемещения и потока при синусоидальной (а) и прямоугольной (б) формах управляющих импульсов

Анализ графиков единичного импульса (рис. 8) показывает, что в системе

программного управления процессом дозирования интегральная ошибка η_2 составляет 20-100%, связанная с инерционными свойствами электромагнитной системы, нестационарностью переходных процессов открытия и закрытия клапана дозатора, а также наличием виброударных режимов на траектории периодического движения (рис. 9).

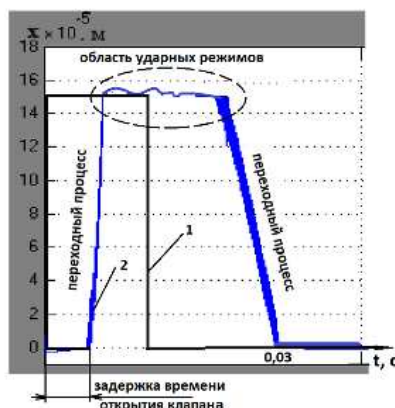


Рис. 9. Иллюстрация характера перемещения клапана дозатора при программном управлении процессом дозирования: 1 – управляющее воздействие; 2 – перемещения клапана дозатора

Моделирование управляемого движения исполнительного элемента позволяет изучить динамические эффекты поведения системы для различных видов управляющего воздействия, а также оценить погрешность, вызванную электромагнитной и управляющими системами.

В третьей главе рассмотрена задача формирования порции дозируемой жидкости, движение которой описано с помощью уравнений несжимаемости вязкой жидкости и теории пограничного слоя

Для вывода дифференциальных уравнений динамики вязкой несжимаемой жидкости используем уравнения динамики сплошной среды в форме уравнения Эйлера:

$$\frac{d\bar{V}}{dt} = \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\bar{V} \cdot \nabla) \bar{V} = \bar{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p; \quad \text{div} \bar{V} = 0 \quad (9)$$

где $\bar{V} = (V_1, V_2, V_3)^T$, $\bar{F} = (F_1, F_2, F_3)^T$ — вектор скоростей и приведенный вектор объемных сил; $V_i = V_i(x_k, t)$, F_i — проекции скорости и объемных сил на соответствующие оси координат ($i, k = 1, 2, 3$); ρ — плотность жидкости, p — гидродинамическое давление или давление в данной точке потока, символьная комбинация $(\bar{V} \cdot \nabla) \bar{V} = \bar{V} \frac{\partial \bar{V}}{\partial x}$, x_k — обозначения координат: x_1, x_2, x_3 .

Основное дифференциальное уравнение нестационарного движения в цилиндрической трубе круглого сечения запишем в виде (рис. 10):

$$\frac{dV_3}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_3} + \nu \nabla^2 V_3, \quad (10)$$

Используя теорию пограничного слоя, преобразуем уравнение (10) к виду:

$$\frac{dV_3}{dt} = -2nV_3 + \frac{\Delta p}{\rho L} \quad (11)$$

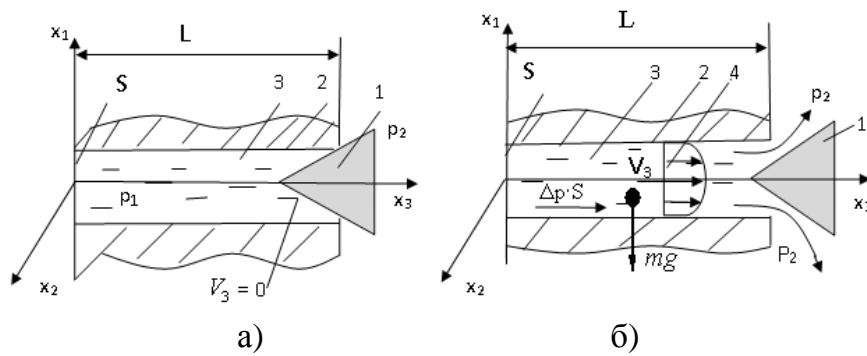


Рис. 10. Приведенная расчетная схема движения жидкости в дозаторе:
 а – закрытое состояние; б – открытое состояние; 1 – запирающий элемент;
 2 – упрощенная модель канала системы подачи жидкости; 3- дозируемая
 жидкость; 4 – эпюра распределения скоростей

После преобразований, при начальных условиях: $t=0$; $x_3=0$; $\dot{x}_3 = V_3 = 0$, получим мгновенный расход жидкости, проходящей сквозь выходное сечение рассматриваемого дозатора:

$$q = \frac{pS}{v_1} \left(1 - e^{-\frac{v_1 T}{\rho L}} \right), \quad (12)$$

где $v_1 = \frac{4\mu}{\Delta^2} \rho L$ - коэффициент гидравлического сопротивления дозатора, который определяется вязкостью μ , плотностью жидкости ρ , а также геометрическими параметрами дозирующей системы: приведенной длиной L , и величиной Δ пограничного слоя.

Таким образом, мгновенный расход жидкости q пропорционален давлению жидкости p и обратно пропорционален коэффициенту гидравлического сопротивления дозатора v_1 , а также экспоненциально зависит от времени открытия клапана T .

Расчеты, выполненные по формуле (12) иллюстрируют зависимости объемного расхода q от времени открытого состояния клапана T для различных коэффициентов гидравлического сопротивления дозаторов.

Установлено, что интегральная ошибка η_3 определяемая относительной погрешностью между теоретическим и реальным расходом жидкости, зависит от длительности управляющего импульса и колеблется в пределах от 0,1 до 25% .

Анализ общей погрешности системы прецизионного дозатора клапанного типа показывает, что погрешность, вызванная электромагнитной системой и системой управления является существенной, поэтому для исследования переходных процессов открытия и закрытия клапана дозатора и проблемы управления электроприводом устройства было проведено исследование системы автоматического управления движением исполнительного устройства прецизионного дозатора при условии контроля величины отклонения реальной траектории движения клапана от заданной.

На рисунке 12 представлены результаты моделирования системы управления с оптимальными параметрами ПИД-регулятора.

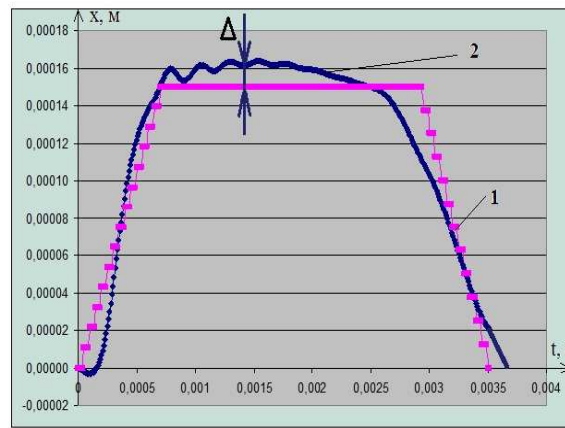


Рис. 11. График зависимости задающего (1) и реального (2) закона движения клапана дозатора от времени: Δ – отклонение заданного закона движения от реального

Определение оптимальных значений k_p , k_d , k_i было осуществлено с использованием модифицированного генетического алгоритма и реализовано в разработанном программном приложении. Интегральная ошибка составила $\eta_2=7\%$.

Четвертая глава посвящена разработке экспериментального стенда для исследования динамики движения исполнительного устройства электромагнитного дозатора жидких сред, адаптивной системе управления. Проведены экспериментальные исследования для идентификации параметров модели и подтверждения достоверности математической модели.

Схема экспериментального стенда, представлена на рисунке 12.

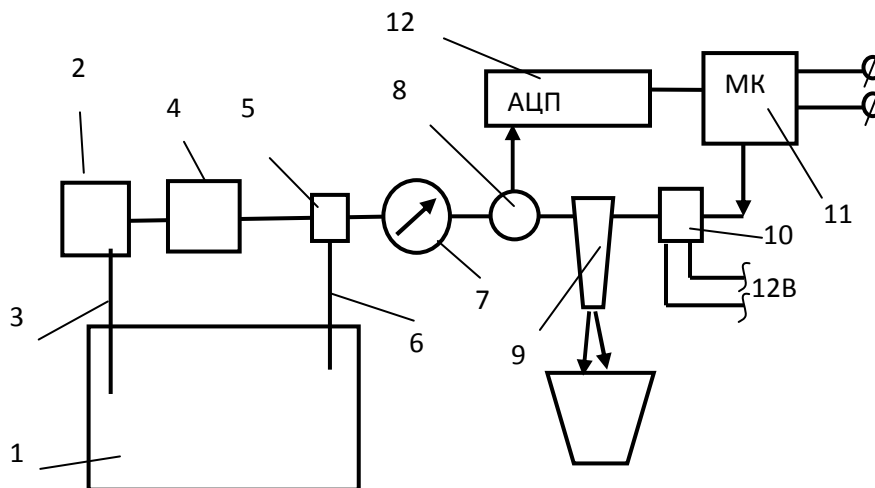
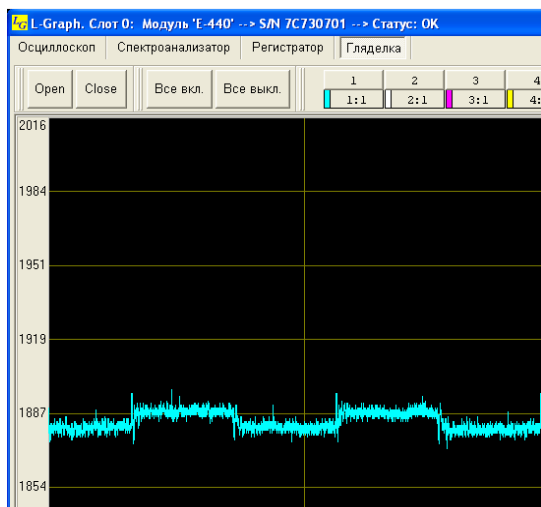


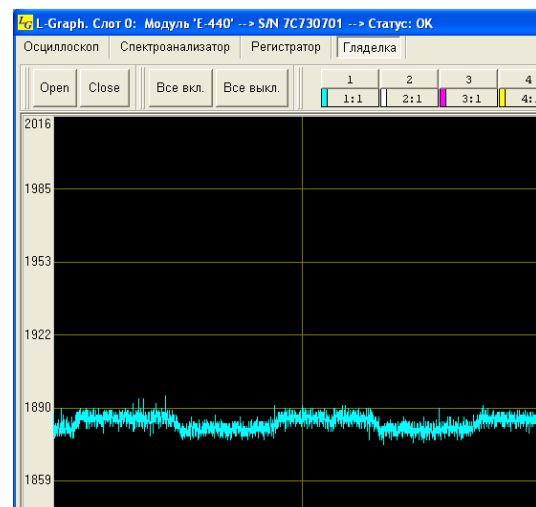
Рис.12. Схема экспериментального стенда для изучения работы прецизионного дозатора: 1 – топливный бак; 2 – электронасос; 3, 6 – трубопроводы подачи и обратной магистрали; 4 – топливный фильтр; 5 – регулятор давления; 7 – показывающий манометр; 8 – электронный датчик давления; 9 – дозатор; 10 – блок управления; 11 – микроконтроллер; 12 – аналого-цифрового преобразователь

На базе исследовательского комплекса был проведен ряд экспериментов по исследованию влияния управляющего импульса на гидравлические процессы, возникающие в дозаторе, предложена методика диагностирования состояния

электромагнитных форсунок, которые использовались в качестве дозирующих устройств, основанная на анализе временных зависимостей давлений в топливных магистралях форсунок (рис. 13) и их спектральном анализе (рис. 14).

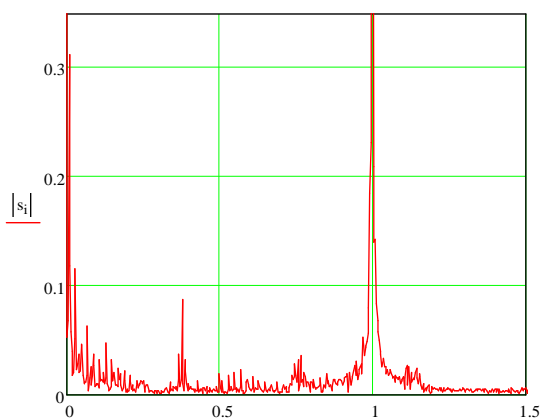


а)

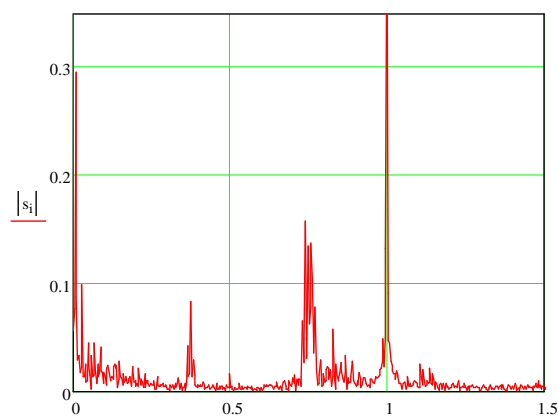


б)

Рис.13. Графики изменения давления в топливной магистрали форсунки:
а – форсунка чистая; б – форсунка загрязнена (пробег 50 000 км)



а)



б)

Рис. 14. Графики спектрального анализа сигналов изменения давления в топливной магистрали форсунок двигателя Z10XE:

а – форсунка чистая; б – форсунка загрязнена

Количественная оценка степени загрязнения форсунок получена при помощи коэффициента k :

$$k = \frac{A_{0.75}}{\sum_{i=1}^{100} A_i} \quad (13)$$

характеризующего отношение амплитуды пика гармоника на частоте 0,75 Гц к сумме амплитуд гармоник от 0,5 до 1,2 Гц. При коэффициенте $k \geq 0,2$ можно говорить о том, что форсунка загрязнена и нуждается в очистке.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

На основе проведенных исследований и обобщений получены следующие результаты:

1. Разработана математическая модель движения исполнительного устройства золотникового типа с учетом свойств уплотнительного кольца и нелинейной модели силы трения между золотником и корпусом, выявлены три области в плоскости параметров сил сухого трения f и амплитуды вынуждающей силы γ_m , приводящие к движению золотника без остановок, с остановками и при критическом значении параметров – отсутствия движения.

2. Предложена математическая модель движения клапана дозатора, рассматриваемого как мехатронная система, в состав которой входят механическая, электрическая и управляющая подсистемы, которая отличается учетом кусочно-линейной силы упругости, сил вязкого трения, моделирующие взаимодействие исполнительного элемента с дозируемой жидкостью.

3. Разработаны инструментальные средства проектирования и расчета дозаторов клапанного типа на базе среды блочного имитационного моделирования программно-вычислительного комплекса Simulink/Matlab, позволяющий исследовать влияние различных видов управляющего воздействия на динамические процессы поведения системы.

4. Предложена математическая модель процесса взаимодействия клапана и седла, представленного в виде упругодеформируемого элемента с кусочно-линейной силой упругости, и установлена функциональная связь между степенью загрязнения седла клапана и силой упругости, которая меняет свои свойства вследствие образования загрязнений на седле.

5. Выявлено, что наиболее существенное влияние в системе дозирования клапанного типа, оказывает погрешность, возникающая в электрической системе и системе управления, которая может составлять $\eta_2 = 20 \div 100\%$. Для повышения точности системы автоматического дозирования предложен новый тип дозатора, обеспечивающий точность дозирования в условиях контроля за положением клапана дозатора по критерию минимизации интегральной ошибки перемещения, составляющей не более $\eta_2 = 7\%$.

6. Разработана математическая модель нестационарного движения жидкости в канале дозатора, на основе теории пограничного слоя и установлена аналитическая зависимость, связывающая мгновенный расход с параметрами дозирующей системы. Выявлено, что объемный расход дозы пропорционален давлению жидкости и обратно пропорционален коэффициенту гидравлического сопротивления дозатора, а также экспоненциально зависит от времени открытия клапана дозатора. Погрешность η_3 , вызванная свойствами дозируемой жидкости, экспоненциально зависит от длительности управляющего импульса, поступающего на обмотку катушки электромагнита.

7. Создана экспериментальная установка на основе электромагнитного дозатора, оснащенная оригинальной системой программного управления и системой измерения параметров, позволяющая выявить влияние управляющего импульса на гидравлические процессы, возникающие в дозаторе. На основе установленных теоретических предпосылок и закономерностей экспериментально определен коэффициент гидравлического сопротивления дозатора в зависимости от геометрических и динамических характеристик дозатора, а также найдена

зависимость значения коэффициента гидравлического сопротивления от расхода дозируемой жидкости.

8. Предложен метод диагностики состояния электромагнитных форсунок, основанный на анализе временных зависимостей давлений в их топливных магистралях и спектральном анализе, которые позволяют по коэффициенту гармоник диагностировать степень загрязнения форсунок и осуществлять их диагностику на дихотомическом уровне («годен-негоден»).

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Российской Федерации:

1. Яцун, С.Ф. Расчет электромагнитного привода клапана ДВС [Текст] / С.Ф.Яцун, С.А.Нижников, **О.В.Емельянова** // Изв. вузов. Серия «Машиностроение». 2007. №2. С.28-38.
2. Яцун, С.Ф. Динамические режимы движения клапана прецизионного дозатора жидких сред [Текст] / С.Ф. Яцун, Ж.Т.Жусубалиев, **О.В.Емельянова** [и др.] // Изв. вузов. Серия «Машиностроение». 2008. №8. С.37-48.
3. Яцун, С.Ф. Исследование влияния параметров импульсного управления на характер движения иглы прецизионного дозатора [Текст] / С.Ф.Яцун, Б.В.Лушников, **О.В.Емельянова** // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2009. С.155-159.
4. Яцун, С.Ф. Моделирование движения жидкости в прецизионном дозаторе [Текст] / С.Ф.Яцун, **О.В. Емельянова**, Е.Н.Политов // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2009. Т.11, №5(2). С.373-377.
5. Яцун, С.Ф. Анализ динамики поршня прецизионного дозатора жидких сред [Текст] / С.Ф. Яцун, Ж.Т. Жусубалиев, **О.В. Емельянова О.В.**, [и др.] // Изв. вузов Северо-Кавказ. региона. 2010. № 1. С. 70-75.

Другие публикации:

1. Яцун, С.Ф. Электромагнитные форсунки впрыска топлива [Текст] / С.Ф.Яцун, **О.В. Емельянова** // Материалы и упрочняющие технологии -2004: сб. материалов XI Рос. науч.-техн. конф. Курск, 2004.С.239-242.
2. Яцун, С.Ф. Моделирование динамического процесса движения иглы форсунки ДВС [Текст]/ С.Ф.Яцун, **О.В. Емельянова** // Вибрационные машины и технологии: сб. науч. тр. Курск, 2005. Ч.1. С. 172–180.
3. Яцун, С.Ф. Моделирование движения клапана форсунки методом крупных частиц [Текст] / С.Ф.Яцун, **О.В. Емельянова** // Изв. Курск. гос. техн. ун-та. 2007. №3 (20). С.8–14.
4. Яцун, С.Ф. Динамический расчет параметров привода электромагнитной форсунки [Текст] / С.Ф.Яцун, **О.В. Емельянова** // Основы проектирования и детали машин - XXI век: материалы Всерос. науч. метод. конф. Орел, 2007. С. 372–378.
5. **Емельянова, О.В.** Стенд для экспериментальных исследований работы электромагнитной форсунки [Текст] / О.В. Емельянова //Образование через науку: материалы науч.- метод. конф. Курск, 2008. С.140–145.
6. **Емельянова, О.В.** Стенд для исследования прецизионного электромагнитного дозатора жидких сред [Текст]/ О.В. Емельянова// Вибрационные машины и технологии: сб. науч. тр. Курск, 2008. С.326–333.
7. Яцун, С.Ф. Исследование управляемых виброударных режимов в электромеханической системе [Текст]/ С.Ф.Яцун, Б.В.Лушников, **О.В. Емельянова**

// Нелинейные колебания механических систем: тр. VIII Всерос. науч. конф.: в 2 т. Н. Новгород, 2008. т.2. С.263–268.

8. **Емельянова, О.В.** Управление движением иглы клапана прецизионного дозатора [Текст]/ О.В.Емельянова, Б.В.Лушников С.Ф.Яцун // Управление динамическими системами: тез. докл. Междунар. конф. М.: ИПМех РАН, 2009. С.45.

9. Яцун, С.Ф. Диагностика работы электромагнитных форсунок ДВС [Текст]/ С.Ф.Яцун, **О.В.Емельянова**, К.В. Чаплыгин // Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня: материалы 11-й Междунар. науч.-практ. конф: в 2 ч. СПб, 2009. Ч.2. С.401–405.

10. Метод диагностики состояния электромагнитных форсунок ДВС [Текст]/ С.Ф.Яцун, **О.В.Емельянова**, Е.Н. Политов [и др.] // Технологии машиностроения и строительства: сб. науч. тр. ПолтНТУ 2009. Т.2, вып.3(25). С.112–116.

11. **Емельянова, О.В.** Исследование динамики распределительного устройства прецизионного дозатора жидких сред [Текст] / О.В.Емельянова, [и др] // Инжиниринг-2009: сб. тр. регион. науч.-практ. конф. Орел. 2009. С.126–131.

12. **Емельянова, О.В.** Программное управление движением исполнительного элемента прецизионного дозатора [Текст]/ О.В. Емельянова // Управляемые вибрационные технологии и машины: сб. науч. ст. в 2 ч. Курск, 2010. Ч.1. С.171–179.

13. Пат. 80942 Российская Федерация : МПК G 01 F 11/00. Микродозатор жидкости [Текст] / Яцун С.Ф., **Емельянова О.В.**; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Курский государственный технический университет». №2008139980/22; заявл. 08.10.2000; опубл.27.02.2009, Бюл.№6. 3с.

14. Пат. 84972 Российская Федерация : МПК⁷ G 01 F 11/00. Устройство для автоматического дозирования жидкости [Текст] / Яцун С.Ф., Лушников Б.В., **Емельянова О.В.**; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Курский государственный технический университет». №2009108678/22; заявл. 10.03.2009; опубл. 20.07.2009, Бюл.№20. 3 с.

15. Пат. 96089 Российская Федерация : МПК⁷ B62 D 57/00. Устройство для перемещения в жидких средах [Текст] / Яцун С.Ф., Мищенко В.Я., **Емельянова О.В.**; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Курский государственный технический университет». №2010107654/22; заявл. 02.03.2010, опубл. 20.07.2010, Бюл.№20. 3 с.

Подписано в печать 26.05.11.Формат 60×84 1/16.
Печ.л.10. Тираж 130 экз. Заказ ____.
Издательство Юго-Западного государственного университета
305040, г.Курск, ул.50 лет Октября, 94.
Отпечатано в ЮЗГУ.