

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ПРЕЦИЗИОННОМ ДОЗАТОРЕ

© 2009 С.Ф. Яцун, О.В. Емельянова, Е.Н. Политов

Курский государственный технический университет

Поступила в редакцию 23.11.2009

В работе рассматриваются вопросы расчета систем дозирования с учетом динамических эффектов и свойств привода ограниченной мощности, обеспечивающего движение исполнительного элемента прецизионного дозирующего устройства.

Ключевые слова: *прецизионный дозатор, математическая модель, управляющий импульс, периодическое движение*

Вопросам проектирования клапанов для различных устройств дозирования уделяется довольно большое внимание. В классических работах [1-3] разработаны основы расчета таких систем. В последние годы в связи с широким распространением прецизионных дозаторов возникает необходимость их расчета с учетом динамических эффектов и свойств привода, обеспечивающего движение исполнительного (запорного) элемента. Особенно это актуально для систем микро- и нано-дозирования, так как в ряде стран сегодня ведутся разработки и исследования микродозаторов с объемом дозы порядка  $10^{-18}$  м<sup>3</sup> и нанодозаторов, позволяющих дозировать объемы растворов до  $10^{-27}$  м<sup>3</sup>. Размер капли (дозы) зависит от массогабаритных характеристик дозатора, вязкости дозируемого материала, давления в момент подачи, времени открытия дозирующего отверстия. Очевидно, что разработка и создание методов расчета таких систем дозирования должна быть основана на комплексном подходе, когда в модели дозатора учитываются свойства как электромеханической, так и гидравлической систем. При этом важным моментом является обеспечение заданного закона движения исполнительного устройства путем применения управляемого электропривода ограниченной мощности.

### Описание дозатора. Расчетная схема.

В качестве схемы электромагнитного дозатора рассмотрим устройство, оснащенное конусным запирающим элементом (клапаном), расчетная схема которого представлена на рис. 1. Запирающий элемент массой  $m$  совершает

поступательное движение под действием силы  $F_{\text{Э}}$  – управляющего электромагнита, кусочно-линейной силы упругости  $P_{\text{упр}}$ , возникающей за счет действия возвратной пружины, жесткостью  $c$ , силы сухого трения  $F(\dot{x})$  и силы вязкого сопротивления  $R(\dot{x}) = \mu\dot{x}$ , вызванной наличием гидравлического сопротивления жидкой среды. За обобщенную координату  $x$  примем перемещение массы  $m$ .

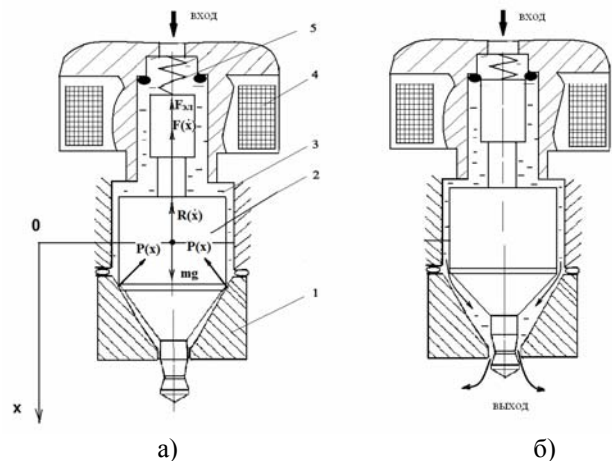


Рис. 1. Расчетная схема электромагнитного дозатора:

а – закрытое состояние дозатора; б – открытое состояние дозатора; 1 – седло клапана, 2 – запирающий элемент, массой  $m$ , 3 – дозируемая жидкость; 4 – обмотки электромагнита; 5 – возвратная пружина

На рис. 2 показана развертка распределенной реакции, действующей на исполнительный элемент со стороны седла клапана. В расчетах эта нагрузка заменена приведенной сосредоточенной силой  $P(x)$  на участке кольцевого зазора, развертку которого на плоскости можно представить отрезком, длиной  $l$  и распределенной нагрузкой,

интенсивностью  $p(x)$ , где  $P(x) = \int_L p(x) dL$ .

Яцун Сергей Федорович, доктор технических наук, профессор кафедры теоретической механики и мехатроники. E-mail: teormeh@inbox.ru

Емельянова Оксана Викторовна, аспирант

Политов Евгений Николаевич, кандидат технических наук, доцент

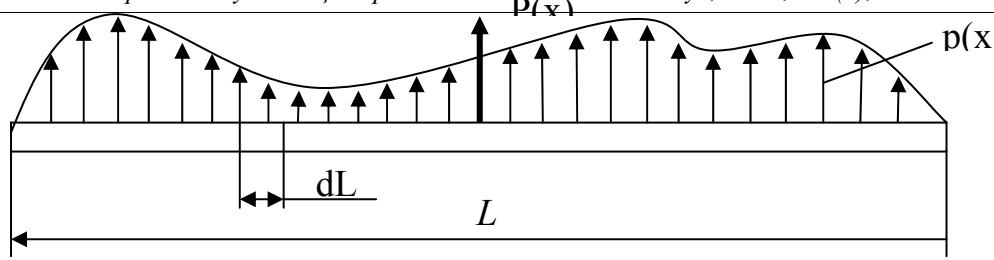


Рис. 2. Развертка распределенной реакции, действующей на исполнительный элемент со стороны седла клапана

Для описания динамических процессов, протекающих в рассматриваемой системе, записаны соответствующие нелинейные дифференциальные уравнения:

$$m\ddot{x} + \mu\dot{x} + P(x) + F(\dot{x}) = -F_{\dot{y}}$$

$$\frac{d\hat{O}}{dt} + \frac{2\hat{O}\delta}{z^2\mu_0 S} R = U(t) \quad (1)$$

где  $x, \dot{x}, \ddot{x}$  – соответственно обобщенная координата, скорость, ускорение;  $\mu$  – коэффициент вязкого трения;  $m$  – масса клапана;  $P(x)$  – кусочно-линейная сила упругого сопротивления;  $F(\dot{x})$  – сила сухого трения;  $U(t)$  – напряжение электрического питания;  $R$  – активное сопротивление катушки электромагнита,  $F_{\dot{y}}$  – электромагнитная сила,  $\Phi$  – магнитный поток;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость;  $S = \pi d^2$  – площадь поперечного сечения кольцевого зазора,  $z$  – число витков проводника с током.

Закон движения иглы клапана зависит от параметров упруго-диссипативных элементов клапана с параметрами упругости  $c$ , вязкости  $\mu$ , а также действующих сил со стороны упругих ограничителей с параметрами  $c_1, c_2$ . В качестве модели сухого трения принята модель, описанная в [4]. На графике, приведенном на рис. 3, представлена зависимость силы трения от скорости

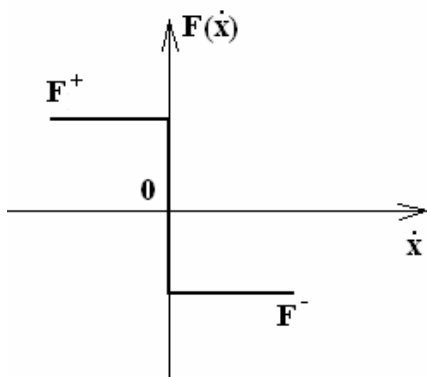


Рис. 3. Модель силы сухого трения

Данную модель аналитически можно представить в виде:

$$F(\dot{x}) = \begin{cases} F \text{sign}(\dot{x}), & \dot{x} \neq 0; \\ -F_0, & \dot{x} = 0, |F_0| \leq F; \\ -F \text{sign}(F_0), & \dot{x} = 0, |F_0| > F. \end{cases} \quad (2)$$

где  $F^+, F^-$  – предельная сила сухого трения;  $F_0$  – равнодействующая всех сил, кроме силы сухого трения,  $\dot{x}$  – скорость вдоль оси  $Ox$ .

К внутренним силам, действующим в рассматриваемой системе, относятся сила упругости  $P_{\text{упр}}$  и сила вязкого сопротивления  $F_{\text{всопр}}$  [5]. Сила упругости в данной системе кусочно-линейна. На рис. 4 представлена зависимость силы упругости от обобщенной координаты:

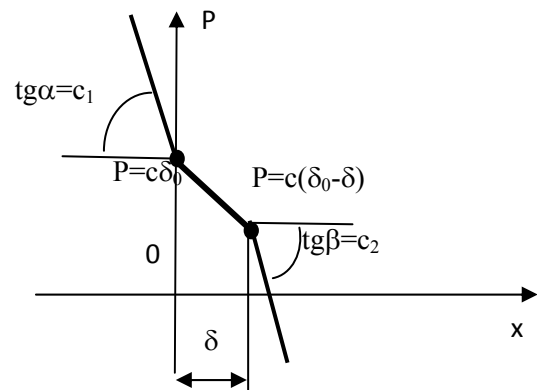


Рис. 4. Модель силы упругости

Модель упругого сопротивления аналитически можно представить в следующем виде:

$$P(x) = \begin{cases} c(\delta_0 - x) & \text{при } 0 \leq x \leq \delta \\ -c_1 x + c\delta_0 & \text{при } x < 0 \\ -c_2(x - \delta) + c(\delta_0 - \delta) & \text{при } x > \delta \end{cases} \quad (3)$$

где:  $\delta$  - рабочий зазор электромагнита;  $\delta_0$  - величина поджатия пружины;  $c$ - коэффициент жесткости пружины;  $c_1, c_2$  - параметры вязкоупругих ограничителей.

Электромагнитная сила, приближенно может быть определена по формуле 4 [4]:

$$F_{\text{э}} = \frac{\Phi^2}{\mu_0 \pi d^2} \quad (4)$$

Система уравнений (1) решается с учетом (2), (3), (4) численным методом с использованием оригинального алгоритма в среде Mathcad 2000, результаты моделирования представлены на рисунках 5, 6.

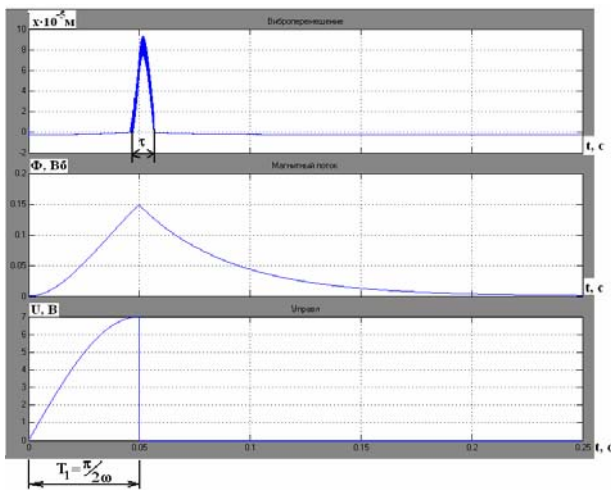


Рис. 5. График перемещения и потока при синусоидальном импульсе, частотой 5 Гц:  $\tau$  - время отрыва клапана от седла

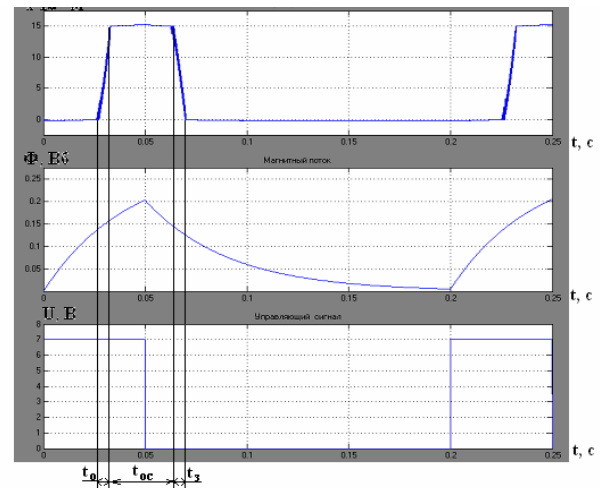


Рис. 6. График перемещения и потока при прямоугольном сигнале, скважность 25%, частота импульсов 5 Гц,  $t_0, t_3$  - фаза открытия и закрытия клапана,  $t_{oc}$  - фаза открытого состояния клапана дозатора

**Расчет объема единичной дозы дозатора.** В качестве расчетной схемы движения жидкости в дозаторе примем модель, представленную на рис. 7. Будем считать, что жидкость несжимаема, запирающий элемент открывается мгновенно, а жидкость в момент открытия имеет нулевую скорость и начинает двигаться как твердое тело на которое действует сила  $\bar{F}$  и сила вязкого сопротивления  $R = v\dot{\xi}$ , вызванная наличием гидравлического сопротивления жидкой среды, где  $v$  - эмпирический коэффициент гидравлического сопротивления дозатора.

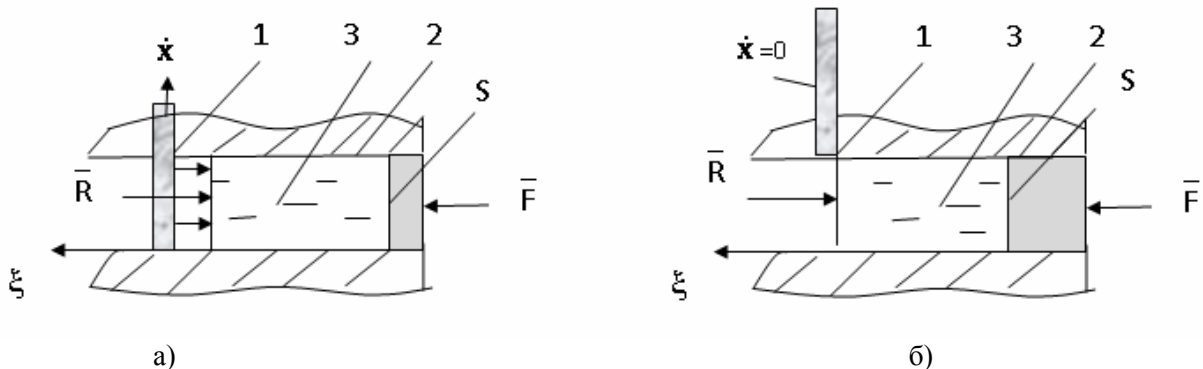


Рис. 7. Приведенная расчетная схема движения жидкости в дозаторе:

1 - запирающий элемент; 2 - упрощенная модель канала системы подачи жидкости; 3 - дозируемая жидкость

Для описания динамических процессов, протекающих в рассматриваемой системе, запишем дифференциальное уравнение движения жидкости, при начальных условиях  $t=0; \xi=0$ ;

$$m\ddot{\xi} = -\bar{R} + \bar{F}; \quad (5)$$

$$\frac{dV}{dt} = -2nV + f; \quad (6)$$

где  $2n = \frac{v}{m}; f = \frac{F}{m} = \frac{pS}{S\rho L} = \frac{p}{\rho L}$ ;

$S$  – площадь сечения отверстия;  $p$ ,  $V$ ,  $\rho$  – давление, скорость и плотность потока жидкости соответственно.

Обозначим:  $U = -2nV + f$ , тогда для  $f = \text{const}$

$$\frac{dU}{dt} = -2n \frac{dV}{dt}; \quad (7)$$

Преобразуем (6) с учетом (7), тогда:

$$\frac{dU}{dt} = -2nU; \quad (8)$$

$$\frac{dU}{U} = -2ndt; \quad (9)$$

Интегрируя уравнение (6) с учетом (7), (8), (9) найдем закон изменения скорости:

$$V = \frac{f}{2n} (1 - e^{-2nt}); \text{ или}$$

$$V = \frac{p}{2n\rho L} (1 - e^{-2nt}) V = \frac{pS}{\nu} \left( 1 - e^{-\frac{\nu}{spL} t} \right); \quad (10)$$

Тогда объемный расход [3] определим как  $q = VS$

$$q = \frac{pS^2}{\nu} \left( 1 - e^{-\frac{\nu}{spL} t} \right); \quad (11)$$

Если запирающий элемент открыт в течении времени  $T$ , то объем дозы  $Q$  найдем по формуле:

$$Q = \int_0^T q(t) dt;$$

После преобразований получим:

$$Q = \frac{pS^2}{\nu} T + \frac{pS^2}{2n\nu} e^{-2nT}; \quad (12)$$

Пусть  $\lambda = \frac{\nu}{S^2}$ ; тогда

$$Q = \frac{p}{\lambda} \left( T + \frac{\rho L}{\lambda S} e^{-\frac{\lambda S}{\rho L} T} \right); \quad (13)$$

Таким образом, объем дозы пропорционален давлению жидкости  $p$  и обратно пропорционален коэффициенту гидравлического сопротивления дозатора  $\nu$ , а также нелинейно зависит от времени открытия  $T$ . На рис. 8 показан график зависимости расхода жидкости от времени для различных коэффициентов гидравлического сопротивления дозаторов.

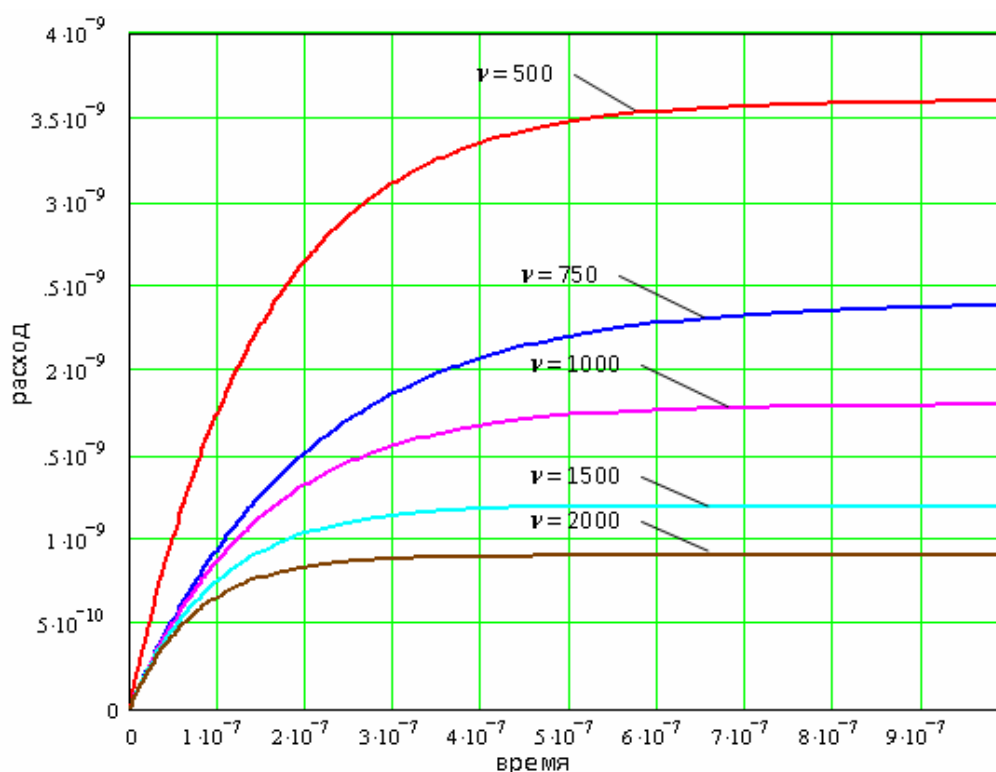


Рис. 8. График зависимостей расхода жидкости от времени для различных дозаторов

**Выводы:** построена математическая модель и получены дифференциальные уравнения, описывающие движение исполнительного органа прецизионного дозатора, разработана методика их решения в нестационарном режиме и выявлена функциональная связь между параметрами свойств системы и расходом жидкости, видом электрического питания электромагнитов для различных физических свойств жидкости, позволяющая определять параметрами дозатора.

Работа выполнена в рамках госконтракта П2144 от 05.11.09.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Баица, Т.М. Гидропривод и гидропневмоавтоматика. – М., Машиностроение, 1972. – 320 с.
2. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
3. Механика жидкости и газа. Избранное / Под общей ред. А.Н. Крайко. – М.: Физматлит, 2003. – 752 с.
4. Яцун, С.Ф. Моделирование динамического процесса движения иглы форсунки ДВС / С.Ф. Яцун, О.В. Емельянова // Вибрационные машины и технологии. Сборник научных трудов. Курск, 2005. Ч.1. – С. 172-180.
5. Яцун, С.Ф. Исследование управляемых виброударных режимов в электромеханической системе / С.Ф. Яцун, Б.В. Лушников, О.В. Емельянова // Труды VIII Всерос. науч. конф. «Нелинейные колебания механических систем» (Нижний Новгород, 22-26 сентября 2008 г.). В 2-х томах. Том 2. Под редакцией Д.В. Баландина, В.И. Ерофеева. – Нижний Новгород: Издательский дом «Диалог культур», 2008. – С.263-268.

## MODELING OF LIQUID MOTION IN THE PRECISION DOSING DEVICE

© 2009 S.F. Yatsun, O.V. Yemelyanova, E.N. Politov

Kursk State Technical University

Questions of calculation the dosing systems in view of dynamic effects and properties of restricted power drive providing movement of executive element of the precision dosing device are observed.

Key words: *precision dosing device, mathematical model, control impulse, periodic motion*