

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕГУЛЯТОРА РАСХОДА ЖИДКОСТИ С ЖЕСТКОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ СВЯЗЬЮ

*Муслимов А.П.* доктор технических наук, профессор КГТУ им. И.Раззакова, г.Бишкек, Кыргызская Республика, 720044. пр. Ч.Айтматова 66. e-mail:

*Гинятуллина А.М.* аспирант КГТУ им. И.Раззакова, г.Бишкек, Кыргызская Республика, 720044. пр. Ч.Айтматова 66. e-mail: [almirabari@gmail.com](mailto:almirabari@gmail.com)

**Аннотация.** В статье представлена разработка математической модели регулятора расхода жидкости с жесткой механической связью для расчета и анализа динамических процессов для черновой и чистовой механической обработок. Рассматриваются вопросы обеспечения качества обрабатываемой поверхности при различных режимах резания,

связанные с разработкой регулятора расхода жидкости с жесткой механической связью универсальной автоматической системы управления режимами работы станка. Проведено теоретическое исследование элементов золотникового регулятора расхода жидкости, составлены уравнения динамики для механической и гидравлической частей золотника, построены зависимости переходных процессов регулятора по аperiодическому и колебательному законам, а также график зависимости расхода жидкости от изменения размеров щели. Разработанная математическая модель регулятора расхода может применяться для расчета и анализа динамических процессов при чистовой или черновой обработках и позволяет сконструировать регулятор расхода жидкости с жесткой механической связью с заранее заданными динамическими характеристиками.

**Ключевые слова:** гидравлический привод станка, золотниковый регулятор расхода жидкости, жесткость технологической системы, уравнение динамики регулятора расхода жидкости.

### THE MATHEMATICAL MODEL OF LIQUID FLOW REGULATOR WITH A RIGID MECHANICAL CONNECTION

*Muslimov A.P. doctor of technical sciences, prof. KSTU named after I. Razzakov, 720044 Bischkek, Kyrgyz Republic, 66 Ch. Aitmatov av.*

*Ginyatullina A.M. art. prep. KSTU named after I. Razzakov, 720044 Bischkek, Kyrgyz Republic, 66 Ch. Aitmatov av. e-mail: [almirabari@gmail.com](mailto:almirabari@gmail.com)*

**Abstract.** The article presents the development of a mathematical model of a fluid flow controller with a rigid mechanical coupling for the calculation and analysis of dynamic processes for roughing and finishing mechanical machining. The problems of ensuring the quality of the surface to be treated under different cutting conditions are considered, related to the development of a liquid flow controller with rigid mechanical coupling of a universal automatic control system for the operating modes of the machine. The theoretical investigation of the components of the spool valve of the liquid flow is made, the equations of dynamics for the mechanical and hydraulic parts of the spool are compiled, the dependences of the regulator's transient processes on aperiodic and oscillatory laws are constructed, as well as the graph of the dependence of the fluid flow on the gap size change. The developed mathematical model of the flow regulator can be used for calculation and analysis of dynamic processes for finishing or rough machining and it allows designing a fluid flow controller with rigid mechanical coupling with predetermined dynamic characteristics.

**Key words:** hydraulic drive of the machine, spool type fluid-flow controller, rigidity of the technological system, equation of the dynamics of the fluid flow regulator.

В технологической системе использован регулятор подачи жидкости золотникового типа, имеющий пропускную щель с острыми краями. Поскольку в нем зависимость расхода масла от величины открытия пропускной щели при подключении к нему редуционного клапана линейна, что удобно для использования в системах с регулированием режимов работ станка.

Математическую модель регулятора расхода жидкости легко получить путем разделения его на два составляющих – механическую (ось золотника) и гидравлическую (щель регулятора) (расчетная схема показана на рис. 1).

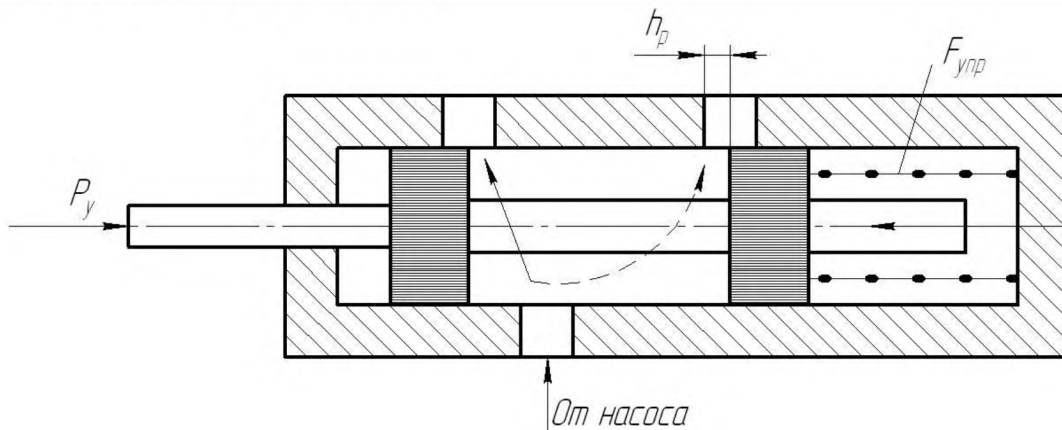


Рис. 1 Расчетная схема золотникового регулятора расхода жидкости

**Механическая часть** золотникового регулятора.

Уравнение динамики регулятора расхода, в этом случае учитывая, что расходы и давления в регуляторе небольшие, то можно пренебречь гидродинамической осевой составляющей силы потока, будет:

$$M \frac{d^2 h_p}{dt^2} + F_v + F_{упр} = P_y, \tag{1.1}$$

- где  $F_v = \vartheta \cdot \frac{dh_p}{dt}$ ,  $\vartheta$  – коэффициент вязкого трения;  
 $P_y$  – радиальная составляющая силы резания;  
 $F_{упр} = ch_p$  – сила пружины;  
 $c$  – коэффициент жесткости пружины;  
 $M$  – масса золотника.

Поделив каждый член уравнения (1.1) на коэффициент жесткости пружины, получим уравнение в преобразованиях Лапласа:

$$(T_z^2 p^2 + 2\xi T_z p + 1)h_p(p) = K_z P_y(p), \tag{1.2}$$

- где  $T_z = \sqrt{\frac{M}{c}} = 0,028$  с – постоянная времени;  
 $\xi = \frac{\vartheta}{2c} \cdot T_z = 1,2$  – коэффициент относительного демпфирования;  
 $K_z = \frac{1}{c} = 2,3 \cdot 10^{-4}$  с<sup>2</sup>/кг – коэффициент усиления регулятора.

Регулятор расхода является одним из сложных динамических звеньев технологической системы управления и его работа в большей степени определяет качество в целом всей системы регулирования.

С учетом введенных выше обозначений дифференциальное уравнение регулятора расхода будет иметь вид:

$$T_z^2 \frac{d^2 h_p}{dt^2} + \xi T_z \frac{dh_p}{dt} + h_p = K_z P_y, \tag{1.3}$$

Дифференциальному уравнению (1.3) соответствует характеристическое уравнение:

$$T_z^2 p^2 + \xi T_z p + 1 = 0. \tag{1.4}$$

Корни характеристического уравнения (1.4):

$$P_{1,2} = -\frac{-2\xi T_z \pm \sqrt{4\xi^2 T_z^2 - 4T_z^2}}{2T_z}.$$

При соотношении  $4\xi^2 T_z^2 > 4T_z^2$ , т.е.  $\xi \geq 1$ , регулятор расхода представляет собой апериодическое звено второго порядка, решение которого имеет вид:

$$h_z = h_{py} \left( 1 - \frac{T}{T_3 - T_4} e^{-\frac{t}{T_3}} + \frac{T}{T_3 - T_4} e^{-\frac{t}{T_4}} \right), \quad (1.5)$$

где  $-T_z^2 = T_3$ ;  $2\xi T_z = T_4$ ;

$h_{py}$  – установившееся значение щели золотника.

Уравнение (1.5) представляет сумму экспонент разными постоянными значениями времени  $T_3$  и  $T_4$ . График такого процесса переходного звена представлен на рис. 2

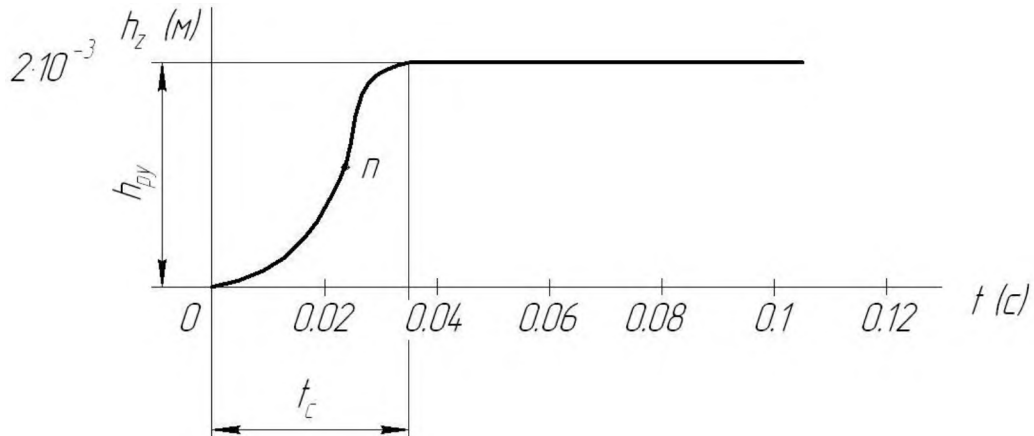


Рис. 2 График переходного процесса регулятора расхода (по апериодическому закону второго порядка)

При  $\xi < 1$  переходный процесс регулятора протекает по колебательному закону и решение дифференциального уравнения (1.3) будет иметь вид:

$$h_z = h_{py} \left[ 1 - e^{-\frac{t}{T}} \left( \cos \omega t + \frac{1}{T\omega} \sin \omega t \right) \right], \quad (1.6)$$

где  $T$  – постоянная времени затухания амплитуды колебаний;  
 $\omega$  – частота колебаний, причем

$$T = \frac{2T_t^2}{2\xi T_t^2} = \frac{1}{\xi}; \quad \omega = \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T}.$$

Время затухания колебаний, т.е. длительность переходного процесса  $t_c \approx 3T$ .

График переходного процесса регулятора расхода по колебательному закону представлен на рис. 3.

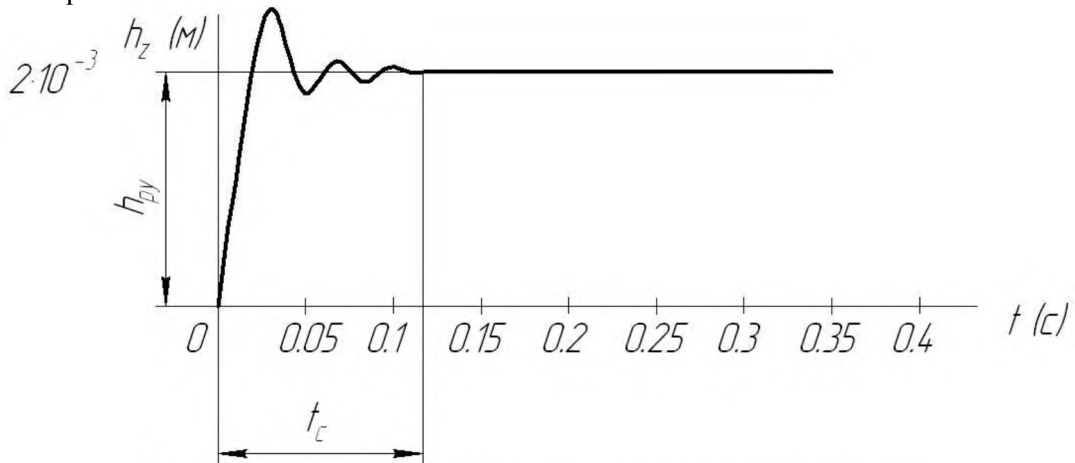


Рис. 3 График переходного процесса регулятора расхода (по колебательному закону)

Таким образом, разработанная математическая модель регулятора расхода, а также приведенное теоретическое исследование позволяет сконструировать его с заранее заданными динамическими характеристиками: вид переходного процесса, длительность его протекания, рассчитывая их массо-геометрические параметры по величинам, входящим в значение  $T_z$  и  $\xi$ .

Рекомендуется брать значение коэффициента относительного демпфирования  $\xi$  несколько больше 1, поскольку в этом случае обеспечивается переходный процесс по аperiodическому закону второго порядка и длительность протекания будет близко оптимальному значению.

Передаточная функция звена:

$$W_M(p) = \frac{k_z}{T_z^2 p^2 + \xi T_z p + 1} \quad (1.7)$$

Для гидравлической части золотника (щели регулятора) справедливо:

$$Q = \mu \pi d_1 h_z \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}},$$

где  $\mu = 0,65$  – коэффициент расхода регулятора;

$d_1 = 12$  мм – диаметр плунжера золотника;

$\rho = 895 \text{ кг/м}^3$  – плотность масла;

$h_z$  – величина открытия щели золотника;

$\Delta p = p_0 - p_1, \Delta p = 0,027969 \text{ кгс/м}^2$  – перепад давления на регуляторе, который является постоянным.

Следовательно, математическая модель данного звена выглядит:

$$Q = h_z k_s.$$

Переходная функция щели:

$$W_{ш}(p) = k_s, \quad (1.8)$$

где  $k_s = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Как видно из математических моделей, зависимость линейная:

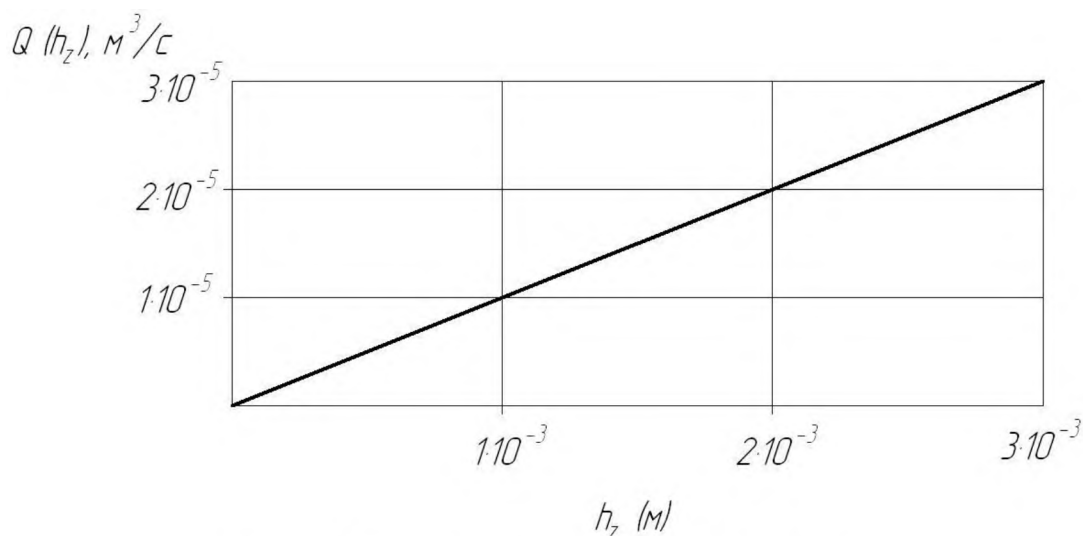


Рис. 4 График зависимости расхода жидкости от изменения размеров щели

Объединяя механическую и гидравлическую части золотникового регулятора, получим математическую модель в изображениях Лапласа:

$$W_z(p) = W_{ш}(p) \cdot W_M(p),$$

или

$$W_z(p) = \frac{k_3}{T_z^2 p^2 + \xi T_z p + 1}, \quad (1.9)$$

где  $k_3 = k_z k_s$ .

Следует отметить, что выведенная математическая модель регулятора расхода справедлива для расчета и анализа динамических процессов путем подстановок в них соответствующих значений переменных в зависимости от вида обработки: чистовой или черновой.

#### Список использованной литературы:

1. Башта Т. М., Гидропривод и гидропневмоавтоматика. М., 1972. 319 с.
2. Навроцкий К.Л. Теория и проектирование гидро- и пневмопривода: М.: Машиностроение, 1991. - 384 с., ил.
4. Попов Д. Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. М., 1987. 464 с.
5. Свешников В.К. Станочные гидроприводы: справочник. 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2008. – 640 с