

## Электротехника

УДК681.513.52

### **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОНТУРА СКОРОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПУАНСОНА НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ГЛУБОКОЙ ВЫТЯЖКИ**

*Е.С. Каплун<sup>1</sup>, В.Е. Лысов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Самарский завод противопожарного оборудования  
446070, Самарская обл., Кинельский р-н, с. Сырейка, Балтийский пр-д, 2

<sup>2</sup> Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Рассматривается система автоматического управления движением пуансона при реализации процесса глубокой вытяжки. Система включает электромеханические, гидравлические и пневмоэлектрические звенья. В статье приводится расчет передаточных функций упомянутых звеньев и алгоритм формирования структуры системы. Рассматривается влияние вариации параметров звеньев системы на динамические показатели качества управления. Оценивается возможность упрощения передаточных функций для инженерного проектирования систем автоматического управления процессами глубокой вытяжки. Приводятся графики переходных процессов в контуре скорости движения пуансона и его перемещения при вариации параметров динамических звеньев системы.*

**Ключевые слова:** контур регулирования скорости перемещения пуансона, пневмопозиционер, запаздывание, постоянные времени, коэффициент передачи звеньев системы.

Система автоматического управления (САУ) процессом глубокой вытяжки построена по принципу адаптивного управления с моделью [1]. В этой связи важно оценить влияние вариации эксплуатационных параметров контура скорости пуансона на динамические показатели качества процесса вытяжки: изменение отклонения усилия вытяжки, скорости и плавности движения пуансона относительно предписанных значений. В случае если они окажутся в пределах технологических ограничений, их можно не учитывать при составлении модели. Это, в свою очередь, способствует упрощению структурно-параметрического синтеза системы в целом.

Основными элементами, которые могут оказывать влияние на динамику контура скорости, являются электропневмопозиционер, а также запаздывание, присутствующее при подаче рабочей жидкости в гидроцилиндр перемещения пуансона, и упругая деформация заготовки на первом этапе вытяжки.

---

*Евгений Сергеевич Каплун, директор Самарского завода противопожарного оборудования, аспирант.*

*Владимир Ефимович Лысов (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электропривод и промышленная автоматика».*

Оценка зависимости динамики процесса от упомянутых выше факторов позволит принять конструктивные меры для снижения их действия при реализации проекта.

Рассмотрим последовательно зависимость вариации параметров от указанных звеньев.

На рис. 1 показана функциональная схема контура скорости, где отмечен электропневмопозиционер. Он представлен в виде цилиндра 2, движение поршня в котором ( $X_{11}$ ) определяется положением золотника 1. Золотниковые распределители применяют благодаря линейной зависимости между расходом рабочего вещества  $Q_1$  и смещением золотника ( $X_1$ ).

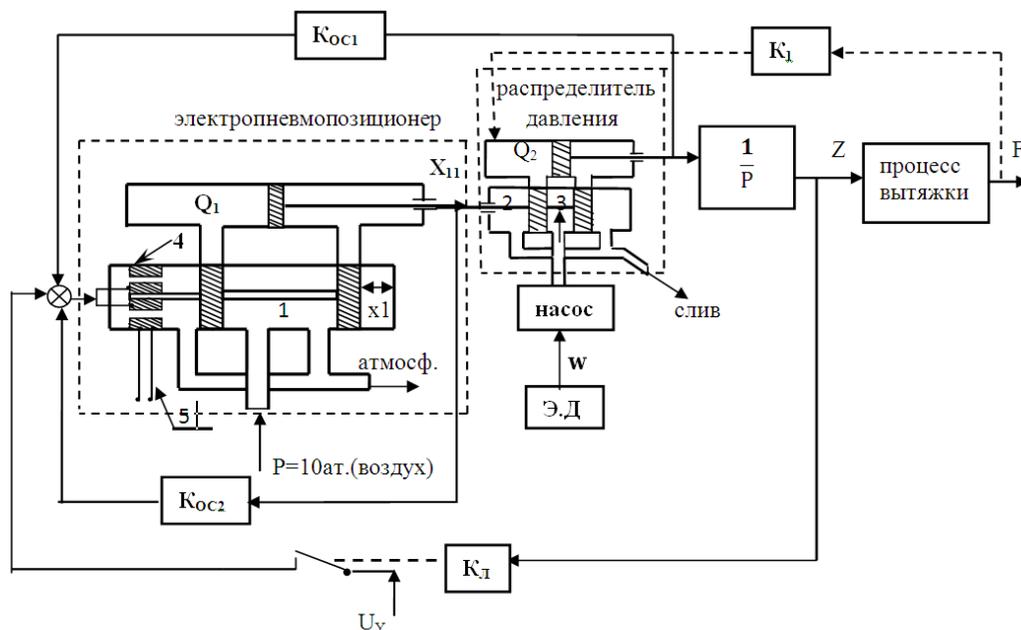


Рис. 1. Функциональная схема контура скорости

Смещение золотника осуществляется электромеханическим преобразователем, который состоит из катушки управления 4, которая расположена на подвижном штоке 1 и на которую подается сигнал управления  $U_y$ , и катушки возбуждения 5 или постоянного магнита, укрепленных на корпусе цилиндра. Перемещение поршня ( $X_{11}$ ) приводит к перемещению золотника 3, который определяет расход рабочей жидкости  $Q_2$  в цилиндре перемещения штока пуансона и его скорость  $\frac{dx}{dt}$ . Для целей стабилизации заданного положения электропневмопозиционер имеет обратную отрицательную связь по положению  $K_{OC1}$ .

С целью стабилизации скорости движения пуансона введена обратная связь по скорости с коэффициентом передачи  $K_{OC1}$ . Для ограничения хода пуансона используется сравнение пройденного пути  $Z$  с заданным и при их равенстве происходит отключение сигнала задания.

Найдем передаточную функцию электропневмопозиционера. Составим уравнения движения золотника 1:

$$m_1 \cdot \frac{d^2 x_1}{dt^2} + b_1 \cdot \frac{dx_1}{dt} + C_1 x_1 = AI; \quad (1)$$

$$U_Y = RI + L \frac{dI}{dt} + N \frac{dx_1}{dt}; \quad (2)$$

$$F = AI = BII, \quad (3)$$

где  $m_1$  – масса подвижных частей золотника 1;

$C_1$  – эквивалентная жесткость управляющих элементов золотника 1;

$b_1$  – коэффициент вязкого трения подвижных частей золотника 1;

$N$  – коэффициент, характеризующий изменение потокосцепления при движении электромагнита ЭМП относительно неподвижных катушек возбуждения;

$A$  – коэффициент электромагнитной связи катушки с магнитом;

$I$  – ток в катушке управления;

$B$  – индукция в катушке управления;

$l$  – длина провода в катушке управления.

Из (1) – (3) в операторном виде получаем:

$$\left[ \frac{m_1 L}{RC_1} p^3 + \left( \frac{m_1 R}{RC_1} + \frac{b_1 L}{RC_1} \right) p^2 + \left( \frac{b_1 R}{RC_1} + \frac{LC_1}{RC_1} + \frac{AN}{RC_1} \right) p + 1 \right] X_1(p) = \frac{AU_Y(p)}{RC_1}. \quad (4)$$

Введем обозначения:  $T_1 = \sqrt{\frac{m_1}{C_1}}$  – механическая постоянная времени электромеханического преобразователя (ЭМП);

$T_E = \frac{L}{R}$  – электромагнитная постоянная времени ЭМП;

$T_2 = \frac{b_1}{C_1}$  – постоянная времени, определяемая инерцией процесса перемещения золотника из-за вязкого трения;

$T_N = \frac{AN}{RC_1}$  – постоянная времени, определяемая потокосцеплением магнитных потоков катушки возбуждения и катушки управления при ее движении.

С учетом введенных обозначений уравнение (4) представим в виде

$$\left[ T_1^2 T_E p^3 + (T_1^2 + T_E T_2) p^2 + (T_2 + T_E + T_N) p + 1 \right] X_1(p) = K_{ЭМП} U_Y(p). \quad (5)$$

Из полученной зависимости запишем выражение для передаточной функции ЭМП:

$$W_{ЭМП}(p) = \frac{X_1(p)}{U_Y(p)} = \frac{K_{ЭМП}}{T_1^2 T_E p^3 + (T_1^2 + T_E T_2) p^2 + (T_E + T_2 + T_N) p + 1}. \quad (6)$$

Анализ (6) и экспериментальные данные [2] показывают на то, что постоянная времени  $T_2$  значительно больше  $T_1$  и  $T_E$ , а поэтому для целей анализа контура скорости САУ процессом глубокой вытяжки принято считать, что

$$W_{ЭМП}(p) = \frac{X_1(p)}{U_Y(p)} = \frac{K_{ЭМП}}{T_S p + 1}. \quad (7)$$

Здесь  $T_S = T_1 + T_2 + T_N$ .

Воздух, попадая в цилиндр 2, обеспечивает перемещение  $X_1$  поршня и штока золотника. Скорость движения золотника определяется расходом жидкости  $Q_1$ , поступающей в цилиндр:

$$S \frac{dx_{11}}{dt} = Q_1, \quad (8)$$

где  $S$  – площадь поршня в цилиндре 2;

$X_{11}$  – перемещение поршня со штоком в цилиндре 2.

Величина расхода воздуха  $Q_1$  определяется

$$Q_1 = \mu \sqrt{\frac{2p}{\rho}} S_{\text{щ}} , \quad (9)$$

где  $\mu=1$  – экспериментальный коэффициент [2];

$S_{\text{щ}}$  – площадь щели золотника для круглой щели,

$S_{\text{щ}} = BH$  – для прямоугольной щели;

$B$  – основание сегмента при открывании щели;

$B_1$  – сторона прямоугольного сечения щели.

С учетом (9) выражение (8) примет вид

$$S \frac{dx_{11}}{dt} = \mu \sqrt{\frac{2p}{\rho}} X_1 B \quad (10)$$

или

$$S \frac{dx_{11}}{dt} = \mu \sqrt{\frac{2p}{\rho}} X_1 B_1. \quad (11)$$

Здесь  $\rho$  – плотность воздуха;

$p$  – давление воздуха в цилиндре 2.

Из полученных выше зависимостей следует

$$S \frac{dx_{11}}{dt} = K_1 X_1 \quad (12)$$

Здесь  $K_1 = \mu \sqrt{\frac{2p}{\rho}} B$  или  $K_1 = \mu \sqrt{\frac{2p}{\rho}} B_1$ .

Переходя к операторной форме записи, определим передаточную функцию, связывающую перемещение штока пневмопозиционера с перемещением штока золотника 1.

$$W_1(p) = \frac{x_{11}(p)}{x_1(p)} = \frac{K_1}{S_{\text{щ}} p} = \frac{K_{11}}{p}. \quad (13)$$

Здесь  $K_{11} = \frac{K_1}{S_{\text{щ}}}$ .

Электропневмопозиционер для целей стабилизации заданного положения оснащен звеном обратной связи по положению. Поэтому структурная схема электропневмопозиционера может быть представлена в виде, показанном на рис. 2, а передаточная функция этого устройства примет вид

$$T^2 = \frac{T_S}{K_{ЭМП}K_{ОС2}K_{11}}; \quad T_1 = \frac{1}{K_{ЭМП}K_{11}K_{ОС2}}. \quad (14)$$

Таким образом, электропневмопозиционер представляет собой типовое колебательное звено. В этой связи необходимо оценить влияние динамики этого звена на работу САУ процессом вытяжки и возможность его учета при разработке модели адаптивной системы.

Связь между расходом жидкости  $Q_2$  в цилиндре распределителя давления (рис. 1) и скоростью движения пуансона определяется зависимостью

$$S_2 \frac{dx}{dt} = Q_2 = \mu \sqrt{\frac{2p}{\rho}} X_{11} B = K_2 X_{11}. \quad (15)$$

Поскольку  $\frac{dx}{dt} = V$ , упомянутая связь между параметрами определяется безынерционным звеном:

$$\frac{V}{x_{11}} = K_3, \quad (16)$$

где  $K_3 = \frac{K_2}{S_2}$ ,  $K_2 = \mu \sqrt{\frac{2p}{\rho}}$ ,  $S_2$  – площадь поршня распределителя давления.

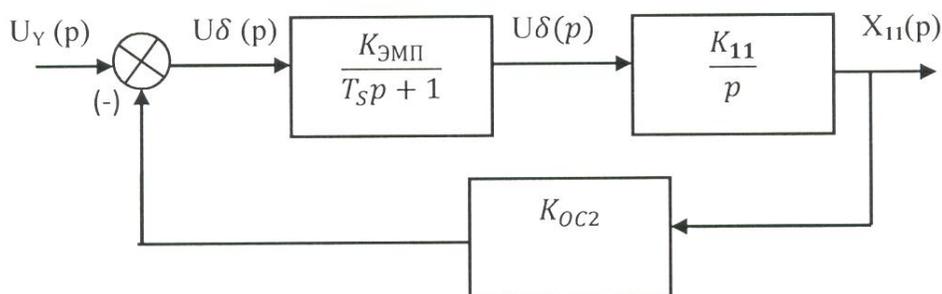


Рис. 2. Структурная схема электропневмопозиционера

Для стабилизации скорости движения пуансона введена обратная связь с коэффициентом передачи  $K_{ОС1}$ . Связь между скоростью движения пуансона и его перемещением осуществляется интегрирующим звеном. Величина перемещения контролируется датчиком перемещения с коэффициентом передачи  $K_{II}$ . При достижении заданного перемещения происходит отключение сигнала задания на систему. Следует оценить влияние запаздывания, вносимого в контур скорости пуансона благодаря передаче рабочей жидкости по гибким шлангам. Это влияние учтено в виде звена в структуре системы (рис. 3) с передаточной функцией

$$W_{\tau}(p) = e^{-\tau p}. \quad (17)$$

Следует также оценить влияние упругого противодействия заготовки на первом этапе процесса вытяжки. Пуансону противодействует усилие, определяемое

степенью прижатия заготовки и ее упругими свойствами. Уравнение, определяющее характер процесса, имеет вид

$$m_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + b_2 \frac{dx}{dt} + C_2 x = F. \quad (18)$$

В зависимости (18) введены обозначения:  $x$  – деформация заготовки,  $F$  – эквивалентное усилие, передаваемое на заготовку со стороны пуансона,  $C_2$  – жесткость заготовки,  $b_2$  – коэффициент диссипативности,  $m_2$  – эквивалентная масса перемещающейся заготовки.

Из выражения (18) получим передаточную функцию, связывающую изменение перемещения заготовки под действием усилия со стороны пуансона:

$$W_Y(p) = \frac{X(p)}{F(p)} = \frac{K_Y}{T_3^2 + T_4 p + 1}. \quad (19)$$

Здесь  $K_Y = \frac{1}{C_2}$  – коэффициент передачи;

$T_3 = \sqrt{\frac{m_2}{C_2}}$  – постоянная времени, пропорциональная ускорению;

$T_4 = \frac{b_2}{C_2}$  – постоянная времени, пропорциональная скорости вытяжки.

С учетом рассмотренных процессов в динамических звеньях полная структурная схема контура скорости изображена на рис. 3.

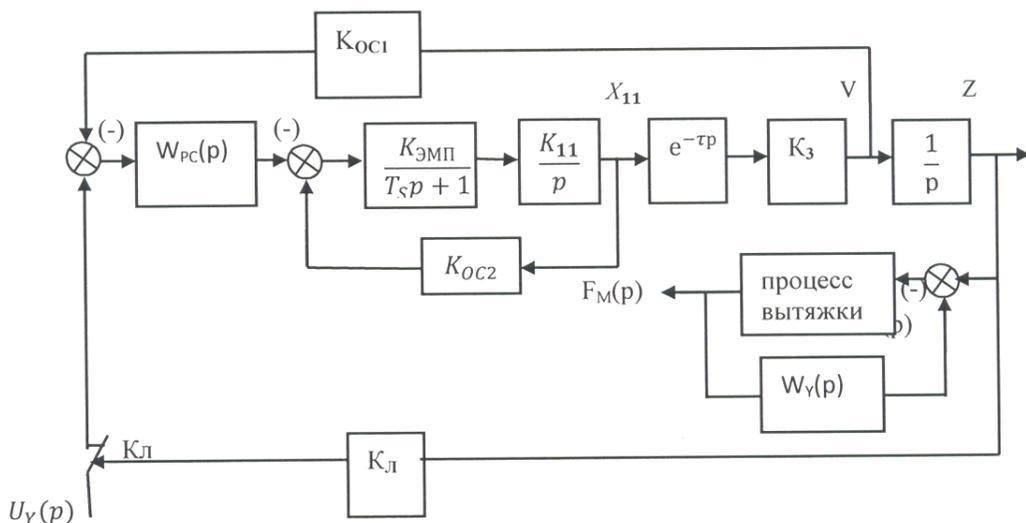


Рис. 3. Структурная схема контура скорости

Анализ влияния отмеченных параметров на динамические показатели качества управления проведем путем моделирования в среде Matlab при следующих численных значениях параметров аппаратуры, входящей в систему:

$$K_{ЭМП} = 0.1 \frac{cm}{B}, T_1 = 0.01c, T_E = 0.0001c, T_N = 0.016c, T_2 = 0.03c, X_1 = 1cm,$$

$$U_Y = 10B, R = 250Om, L = 0.025Гн, A = 250 \frac{B}{A}, I = 20\mu A, C_1 = 10 \frac{kg}{cm}, b_1 = 0.3 \frac{kg \cdot c}{c},$$

$$T_S = 0.047c, \mu = 1 \frac{cm}{c^2}, B_1 = 4cm, S_{Ш} = 50cm^2, \rho = 1,3 \frac{к\Omega}{M^3}, K_1 = 500 \frac{cm^2}{c},$$

$$F = 300 \frac{к\Omega c^2}{M}, C_2 = 10^5 \frac{к\Omega}{M}, b_2 = 10 \frac{к\Omega}{M}, p = 10 \frac{к\Omega}{cm^2}, N = 8 \frac{Bc}{M}$$

$$K_3 = 598 \frac{cm^3}{c}, S_2 = 95cm^2, K_{OC1} = 0.16 \frac{Bc}{cm},$$

Результаты моделирования показаны на рис. 4, 5.

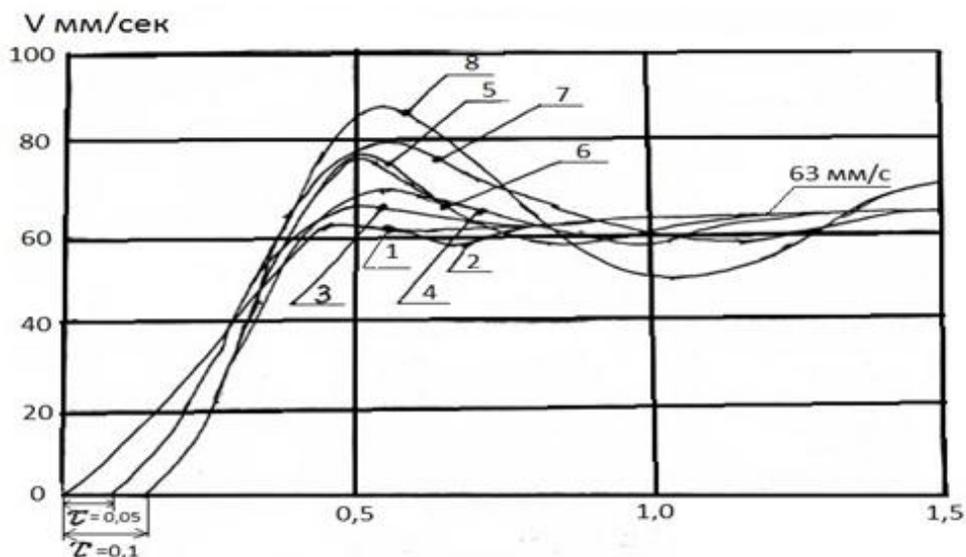


Рис. 4. Переходный процесс в контуре скорости

1.  $\tau = 0; W_H(p) = \frac{0.1}{0.1p+1}; W_Y(p) = 0; F_H = 0; \sigma \cong 2\%$ ;
2.  $\tau = 0; W_H(p) = \frac{0.1}{0.1p+1}; W_Y(p) = 0; F_H \neq 0; \sigma \cong 2\%$ ;
3.  $\tau = 0,05; W_H(p) = \frac{0.1}{0.1p+1}; W_Y(p) = 0; F_H \neq 0; \sigma \cong 4\%$ ;
4.  $\tau = 0,05; W_H(p) = \frac{0.1}{0.1p+1}; W_Y(p) = \frac{0.1}{0.003p^2 + 0.0001p+1}; F_H \neq 0; \sigma \cong 11\%$ ;
5.  $\tau = 0,05; W_H(p) = \frac{0.1}{0.0046p^2 + 0.1p+1}; W_Y(p) = \frac{0.1}{0.003p^2 + 0.0001p+1}; F_H \neq 0; \sigma \cong 22\%$ ;
6.  $\tau = 0,1; W_H(p) = \frac{0.1}{0.1p+1}; W_Y(p) = 0; F_H \neq 0; \sigma \cong 25\%$ ;
7.  $\tau = 0,1; W_H(p) = \frac{0.1}{0.1p+1}; W_Y(p) = \frac{0.1}{0.003p^2 + 0.0001p+1}; F_H \neq 0; \sigma \cong 27\%$ ;
8.  $\tau = 0; W_H(p) = \frac{0.1}{0.0046p^2 + 0.1p+1}; W_Y(p) = \frac{0.1}{0.003p^2 + 0.0001p+1}; F_H \neq 0; \sigma \cong 40\%$ .

На рис. 4 обозначены кривые и каждой из них дано описание в подрисуночной подписи. Из анализа рис. 4 следует, что только кривые 1, 2, 3, 4 удовлетворяют техническим требованиям к плавности перемещения пуансона и, следовательно, к допустимому колебанию усилия вытяжки. Кривая 5 также удовлетворяет плавности изменения усилия вытяжки и допустимой ее величине, но имеет большое (22 %) перерегулирование по скорости движения пуансона. Кривые 6, 7, 8, имеющие запаздывание 0.1 с, неудовлетворительны по критерию допустимости изменения усилия вытяжки в процессе перемещения пуансона.

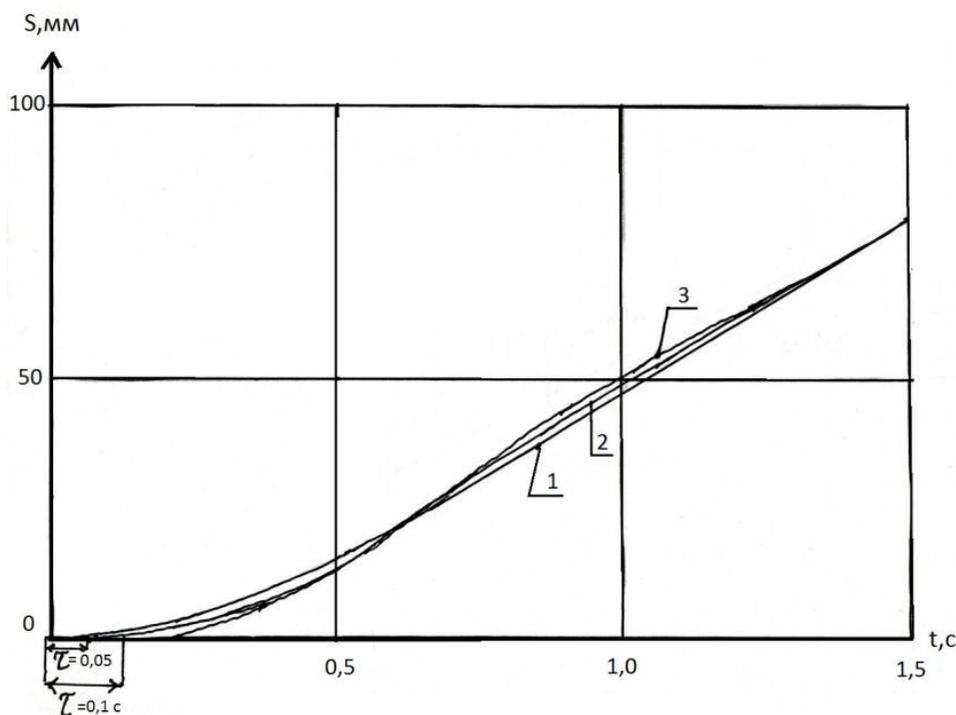


Рис. 5. Плавность хода пуансона:

1 – перемещение пуансона при  $\tau = 0$ ; 2 – то же при  $\tau = 0,05$  с; 3 – то же при  $\tau = 0,1$  с

Кривые, характеризующие изменение перемещения пуансона и изменение усилия вытяжки, показаны на рис. 5. Анализ показывает, что при запаздывании в 0,1 с происходит изменение плавности перемещения пуансона, вследствие чего усилие вытяжки изменяется на 250-300 кг, что недопустимо.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Носов и др. – М.: Альянс, 2011. – 423 с.
2. Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю. Технология холодной штамповки. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
3. Лысов В.Е. Теория автоматического управления. – М.: Машиностроение, 2010. – 500 с.

Статья поступила в редакцию 12 декабря 2013 г.

# ANALYSIS OF THE IMPACT OF THE DYNAMICS OF THE PUNCH VELOCITY LOOP UNITS MOVEMENT ON THE QUALITY OF THE AUTOMATIC SYSTEM OF DEEP DRAWING PROCESS

*E.S. Kaplun<sup>1</sup>, V.E. Lysov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Samara Plant of Firefighting Equipment

2, Baltic Proyezd, village Syreyka, Kinelsky District, Samara region, 446070

<sup>2</sup> Samara State Technical University

244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

*The paper considers a system of automatic traffic punch control under deep drawing process. The system includes electromechanical, hydraulic and pneumoelectric elements. The article provides derivation of transfer functions of the mentioned elements and the structure system formation. It examines the impact of the elements parameters variations on the dynamic performance quality control. The authors evaluate the possibility of simplifying of transmission functions for engineering design of deep-drawing process automatic control systems. The article provides graphic transients in the speed loop a punch movement and its movement at a variation of parameters of dynamic elements of the system.*

**Keywords:** control loop speed of the punch, pneumatic positioner, delay, time constants, transfer efficiency of the system links.

---

*Evgeny S. Kaplun, Postgraduate Student.  
Vladimir E. Lysov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*