

УДК 621.3.07

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ТОНКОЙ ВЫТЯЖКИ**В.Е. Лысов, А.П. Синюков***Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: epa@samgtu.ru

Аннотация. Рассмотрен технологический процесс глубокой вытяжки с учетом высокой степени деформации металла и малой толщины (0,5 мм) заготовки. С учетом высокой сложности процесса и невозможности его представления в аналитической форме в работе используется его представление в виде фазового портрета в плоскости усилия вытяжки и перемещения пуансона гидравлического пресса. Фазовые траектории в упомянутой плоскости определяют геометрические размеры изделия, характеризуют напряжения и деформацию в ходе процесса и определяют структуру алгоритма управления процессом. Рассматриваемая в работе цифровая позиционно-следающая система включает электромеханические, гидравлические, пневмоэлектрические и электронные звенья. Система обеспечивает прецизионное позиционирование пуансона гидравлического пресса с контролем и управлением его скорости перемещения. В работе предоставлена идеальная математическая модель процесса вытяжки. В результате сравнения фазовых траекторий модели и реального процесса выявляется возможная разность в силу действующих помех на реальном процессе. Полученная разность позволяет сформировать в системе дополнительное управляющее воздействие на контур управления скоростью пуансона с целью компенсировать возникшее рассогласование. Таким образом реализуется стабилизация усилия вытяжки в функции перемещения пуансона. В работе приводятся математические описания всех звеньев системы, предоставлены динамические характеристики процесса. В качестве возмущающих воздействий на процесс вытяжки рассмотрены: упрочнение металла, непостоянная сила трения, возникающая при прижиме заготовки, изменение усилия вытяжки при сопряжении частей заготовки, втягиваемой в матрицу, гофрообразование, утонение металла при переходе донной части к боковой стенке изделия. Упомянутые возмущения без рассматриваемой системы не в полной мере обеспечивали качество изделий. Вследствие возникающего брака имели место значительные производственные затраты. Материалы работы и численные данные звеньев системы технологического процесса получены на примере изготовления баллона автомобильного порошкового огнетушителя ОП-2(3)-АВСЕ, выпускавшегося на заводе «Сам ЗПО» (завод противопожарного оборудования).

Ключевые слова: глубокая вытяжка, передаточная функция, модель процесса, контур регулирования скорости перемещения пуансона, пневмопозиционер, запаздывание, коэффициент передачи звеньев системы.

* Лысов Владимир Ефимович, профессор кафедры «Электропривод и промышленная автоматика», доктор технических наук, профессор.

Синюков Андрей Павлович, магистрант.

Введение

Для деталей, изготавливаемых с помощью процесса глубокой вытяжки, используют листовый металл [1] с высокими пластическими свойствами: сталь с низким содержанием углерода, конструкционную сталь, разнообразные сплавы алюминия, латунь, медь и др. Реализацию процесса вытяжки производят в специальных штампах [2, 3].

С помощью вытяжки изготавливают разнообразные полые детали из заготовок плоского листового металла или полых тонкостенных заготовок, обычно не требующих дальнейшей обработки, кроме обрезки неровного края. К ним относятся:

- детали в форме тел вращения: днища разнообразных цилиндрических резервуаров, посуда из металла, корпуса осветительной арматуры и др.;
- коробчатые детали: топливные баки, бидоны для горюче-смазочных материалов, тара для продуктов консервного производства и пр.;
- детали с одной осью симметрии или ассиметричные: детали автомобилестроительного производства – крыша автомобиля, его двери, капот и пр.;
- цилиндрические детали, у которых толщина дна больше толщины стенок: артиллерийские гильзы, гильзы стрелкового оружия, металлическая посуда с толстым дном и пр.

Вышеуказанные детали могут принимать диаметр (или длину) – от нескольких миллиметров до нескольких метров и толщину стенки от десятых долей до десятков миллиметров.

В зависимости от высоты детали процесс вытяжки может осуществляться в один или несколько переходов. За первый переход плоскую заготовку вытягивают в полу, открытую с одного конца деталь или полуфабрикат (рис. 1, *а*); в дальнейших переходах увеличивается высота при одновременном уменьшении поперечных размеров полуфабрикатов, полученных на предыдущих переходах вытяжки (рис. 1, *б*).

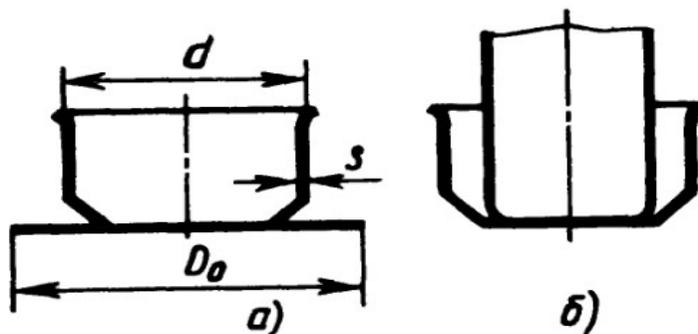


Рис. 1. Переходы вытяжки: *а* – первый; *б* – последующий

За один переход вытяжки можно получить детали, высота которых не превышает 0,7–0,8 диаметра. При вытяжке более высоких деталей нежелательные напряжения, возникающие в стенке, возрастают настолько, что может наступить отрыв дна. В связи с этим процесс вытяжки необходимо разделять на несколько переходов, что позволяет уменьшить радиальные растягивающие напряжения в стенках вытягиваемой детали.

Графическое представление процесса вытяжки

Степень качества полуфабриката в итоге определяется на втором переходе вытяжки. При глубокой вытяжке в месте перехода донной части к боковой стенке происходит утонение $10 \div 20\%$, у торца изделия утонение $10 \div 20\%$. Однако учитывая, что $S = 0,5$ мм, будем считать, что толщина утонения постоянна.

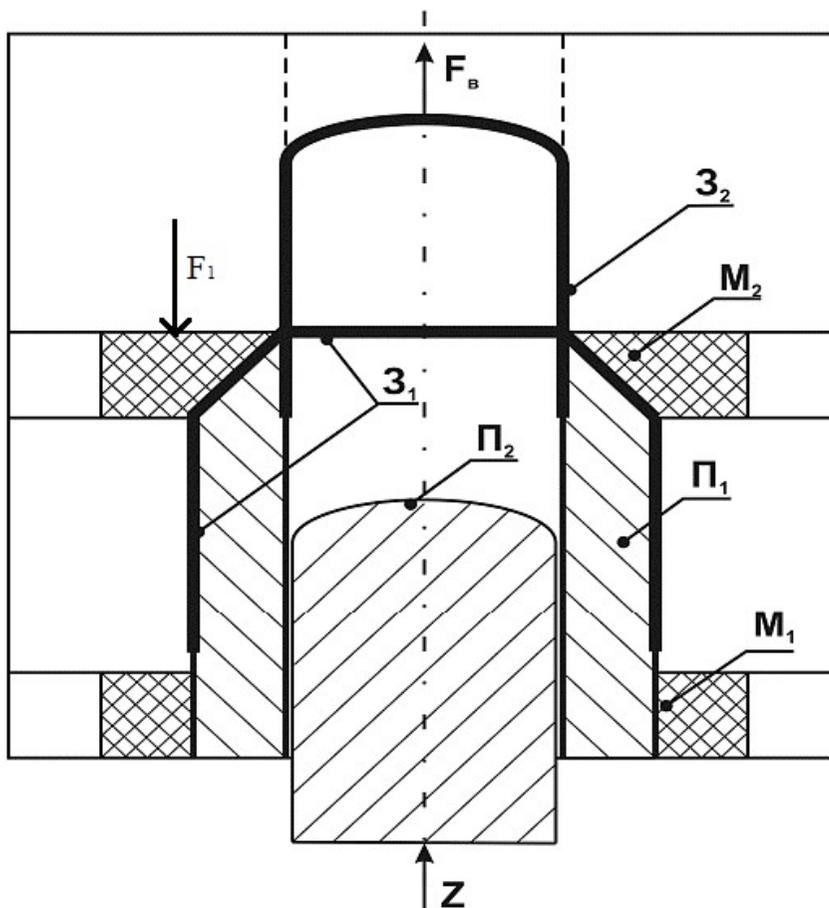


Рис. 2. Схема процесса вытяжки:

Π_1 – пуансон первой вытяжки; Π_2 – пуансон второй вытяжки; M_1 – матрица первой вытяжки; M_2 – матрица второй вытяжки; Z_1 – заготовка после первой вытяжки; Z_2 – заготовка после второй вытяжки; F_v – усилие вытяжки; Z – перемещение пуансона; F_1 – сила прижатия заготовки

Схематичное изображение второго перехода процесса вытяжки представлено на рис. 2. Заготовка в виде стакана Z после первого перехода расположена между поршнем Π_1 и матрицей первого перехода M_1 и прижимается с силой F_1 . Воздействуя усилием F_v , исходящим от поршня Π_2 в направлении Z , заготовка Z втягивается в матрицу M_2 , с помощью которой и формируются финальные размеры детали, а ход поршня Π_2 по оси Z определяет высоту детали. Скорость движе-

ния поршня определяется объемом расхода гидравлической жидкости, подаваемой в цилиндр поршня P_2 .

В процессе вытяжки и деформации значительной степени с малой толщиной металла исходного материала возникает множество неблагоприятных напряжений. Для достижения высокой производительности и стабильного усилия вытяжки на предельно допустимом уровне необходимо стабилизировать величину усилия на втором переходе вытяжки.

Следует отметить, что в процессе вытяжки меняются механические свойства материала [3–5]. Эти изменения могут привести к возникновению недопустимых усилий вытяжки с постоянной скоростью и соответственно к браку – разрыву металла, появлению трещин и, следовательно, безвозвратной потере материала и другим затратам. С этой целью необходимо использовать [5] идентификацию процесса как объекта системы автоматического управления глубокой вытяжкой с представлением математической модели объекта и его структурной схемы.

В практике на характер распределения напряжений оказывает значительное влияние ряд факторов: силы трения, упрочнение металла, сопряжение и изгиб частей заготовки при втягивании ее в матрицу.

Использование математических моделей дает возможность исследовать протекание технологического процесса от упомянутых выше воздействий и определить меры компенсации. Кроме того, математическая модель помогает выделить доминирующие воздействия.

В силу сложности процесса [6] невозможно представить его в аналитической форме. Поэтому процесс представим в виде изображающей траектории в системе координат ZOF (рис. 3). Упомянутая плоскость определяет геометрию изделия, характеризует напряженно-деформированное состояние в ходе процесса и определяет структуру алгоритма управления процессом.

По оси Z откладывается перемещение пуансона пресса, по оси F – усилие вытяжки.

Описание участков диаграммы: Z_{xx} – участок прямого холостого хода, зависит от конструкции пресса; Z_2 – натягивание заготовки на дно пуансона и придание формы торцу детали; Z_3 – процесс начала втягивания пуансона с заготовкой в матрицу M_2 . Участок характеризуется резким увеличением усилия противодействия F_3 при малом перемещении пуансона. При втягивании пуансона на всю длину Z_4 матрицы происходит возрастание усилия до F_4 при сохранении предельно допустимого растягивающего напряжения. После прохождения матрицы M_2 усилие вытяжки возрастает незначительно – до величины F_5 на участке Z_5 . Участок Z_6 определяет разгрузку пуансона после останова до значения F_{xx} . Участок Z_7 описывает обратный ход пуансона в исходное положение. На диаграмме отмечены технологические допуски как по отклонению перемещения Z_i в виде ΔI_i , так и по отклонению усилия вытяжки ΔF_i . Чтобы обеспечить устойчивость и повторяемость процесса глубокой вытяжки, необходимо поддерживать расположение изображающей траектории каждой итерации процесса в границах, установленных согласно траектории в плоскости ZOF .

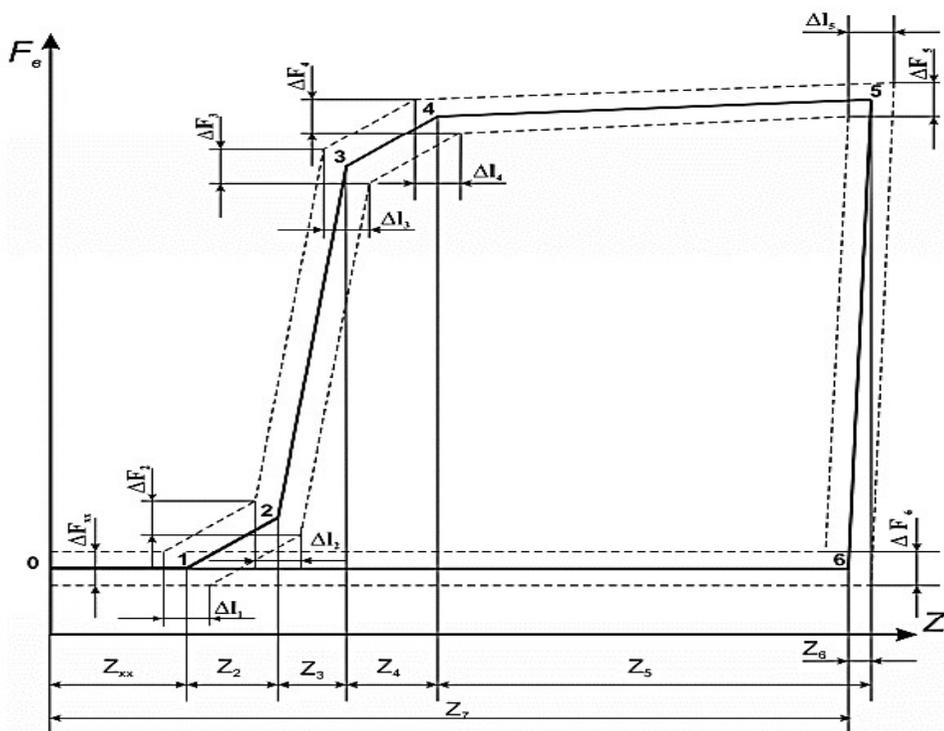


Рис. 3. Диаграмма формирования усилия вытяжки

Синтез системы автоматического управления процессом вытяжки

На основе описанных процессов составляется функциональная схема объекта управления процессом глубокой вытяжки совместно с электрогидропневматической аппаратурой, обеспечивающей реализацию процесса.

Основными факторами, которые могут оказывать влияние на динамику контура скорости, являются наличие электропневмопозиционера, а также влияние запаздывания и упругих деформаций заготовки на первом этапе вытяжки.

Оценка влияния динамики процесса от упомянутых выше факторов позволяет принять конструктивные меры для снижения их действия при реализации САУ.

На рис. 4 изображена функциональная схема контура скорости, где отмечен электропневмопозиционер. Он представлен в виде цилиндра 2, движение поршня в котором (X_{11}) определяется положением золотника 1. Применение золотниковых распределителей обусловлено линейной зависимостью между расходом гидравлической жидкости Q_1 и перемещением золотника (X_1).

Золотник смещается за счет электромеханического преобразователя, в составе которого – катушка управления 4, которая расположена на подвижном штоке 1 и на которую подается сигнал управления U_y , и катушка возбуждения 5 или постоянный магнит, размещенный на корпусе цилиндра.

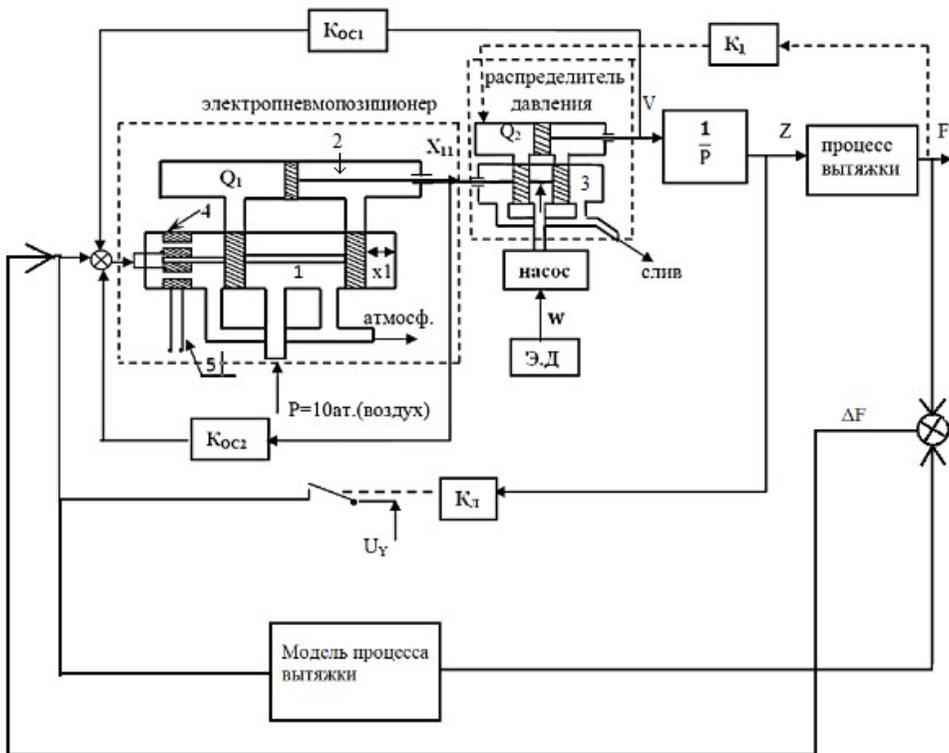


Рис. 4. Функциональная схема САУ процессом вытяжки

Движение поршня (X_{11}) приводит к перемещению золотника 3, который определяет расход гидравлической жидкости Q_2 в цилиндре перемещения штока пуансона и его скорость $V = \frac{dx}{dt}$. Для целей стабилизации установленного положения электропневмопозиционер снабжен обратной отрицательной связью по положению K_{oc2} .

Для стабилизации скорости движения пуансона применена 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.

Передаточная функция [7] электропневмопозиционера:

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

В (1) принято: T_S – постоянная времени электропневмопозиционера; K_{EMP} – коэффициент передачи.

Передаточная функция, связывающая перемещение штока электропневмопозиционера с перемещением штока золотника 1:

$$W_1(p) = \frac{Q_2(p)}{x_1(p)} = \frac{K_1}{S_S p} = \frac{K_{11}}{p}, \quad (2)$$

где $K_{11} = \frac{K_1}{S_s}$.

В (2) обозначено: K_1 – коэффициент передачи, определяющий связь между расходом жидкости и перемещением штока золотника; S_s – площадь щели золотника.

Электропневмопозиционер имеет звено обратной связи для реализации целей стабилизации заданного. Поэтому передаточная функция представлена в виде колебательного звена:

$$W_p(p) = \frac{x_{11}(p)}{U_{oc}(p)} = \frac{1}{K_{oc2}} \frac{1}{T^2 p^2 + T_1 p + 1}. \quad (3)$$

В (3) принято: K_{oc2} – коэффициент обратной отрицательной связи по положению электропневмопозиционера; T^2 – постоянная времени; T_1 – механическая постоянная времени.

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.

Передаточная функция, связывающая расход жидкости Q_2 в цилиндре распределителя давления [6] и скорость движения пуансона:

$$W_2(p) = \frac{V(p)}{x_{11}(p)} = K_3, \quad (4)$$

где K_3 – расход рабочей жидкости.

Передаточная функция, учитывающая влияние запаздывания, вносимого в контур скорости пуансона благодаря передаче рабочей жидкости по гибким шлангам:

$$W_\tau(p) = e^{-\tau p}. \quad (5)$$

Здесь τ – время запаздывания в гидравлической системе.

С учетом рассмотренных процессов в динамических звеньях полная структурная схема адаптивного управления процессом вытяжки изображена на рис. 5.

Расчет регулятора скорости

Расчет регуляторов осуществляется на основе теории систем подчиненного регулирования [8–10].

Настройка производится на технический оптимум:

$$W_{RS}(p) \cdot W_p(p) = \frac{1}{2T_\mu p (T_\mu p + 1)}. \quad (6)$$

Отсюда $W_{RS}(p) = \frac{1}{2T_\mu p (T_\mu p + 1) W_p(p)}$.

В (6) обозначено: T_μ – малая постоянная времени, определяемая совокупностью постоянных времени электропневмопреобразователя.

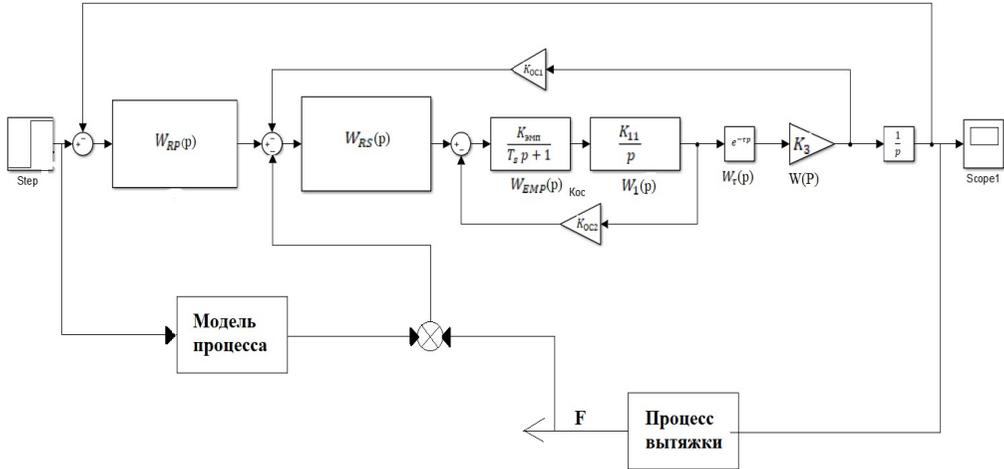


Рис. 5. Структурная схема

Расчет регулятора положения

Расчет регулятора положения ведется по формуле

$$W_{RP}(p) \cdot W_F(p) \cdot \frac{1}{p} = \frac{1}{4T_\mu p (2T_\mu p + 1)}, \quad (7)$$

$W_F(p)$ – передаточная функция замкнутого по скорости контура.

Из (7) следует:

$$W_{RP}(p) = \frac{p}{4T_\mu p (2T_\mu p + 1) W_F(p)}.$$

Из зависимости (7) следует, что полоса пропускания контура положения определяется малой постоянной времени T_μ .

Для реализации цифровой системы используем экстраполятор нулевого порядка [11], указанный на рис. 6 в виде звена Zero-Order Hold с периодом дискретности $T_0 = \frac{2\pi}{20\omega_c}$.

На рис. 6 представлена схема модели системы адаптивного управления при численных значениях промышленного пресса. Модель реального процесса представлена кусочно-линейными звеньями, отражающими усилия вытяжки в функции положения пуансона согласно диаграмме вытяжки.

Связь усилия и расхода будет осуществляться через коэффициент, равный 0.05. Моделирование проводилось в среде MATLAB Simulink. При моделировании значения передаточных функций были указаны на рис. 6.

При введении эквивалентной помехи, равной 500 кг, усилие остается стабильным (рис. 7).

Кривая графика скорости, в свою очередь, изменяется следующим образом (рис. 8).

По рис. 8 нужно отметить, что при внесении помехи происходит коррекция скорости, что позволяет достичь требуемых производственных параметров.

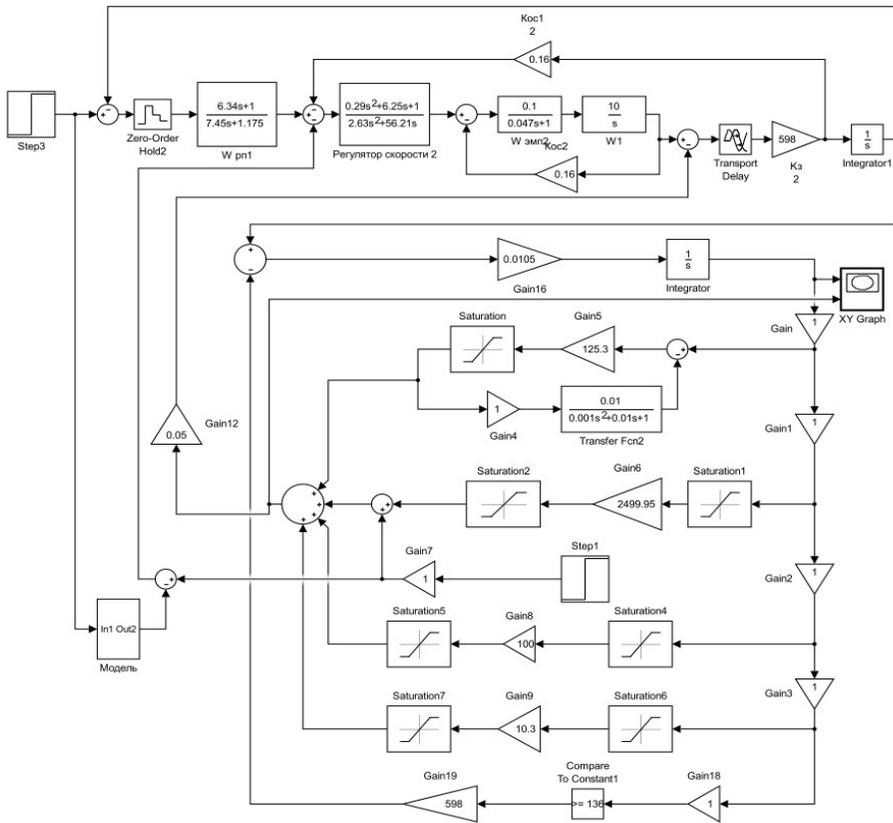


Рис. 6. Схема модели адаптивного управления процессом вытяжки с контролем скорости

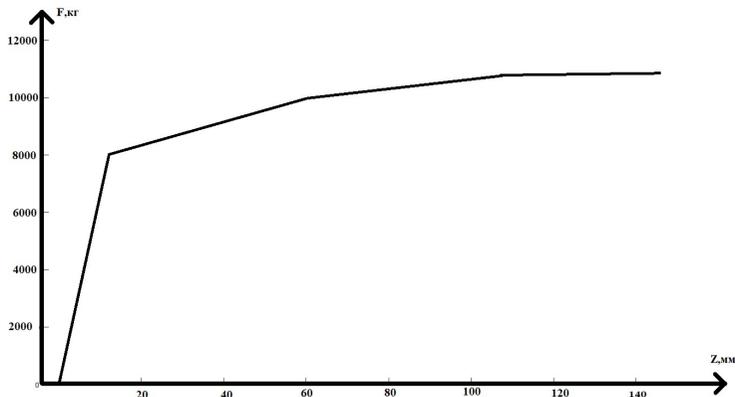


Рис. 7. Усилие вытяжки с коррекцией скорости

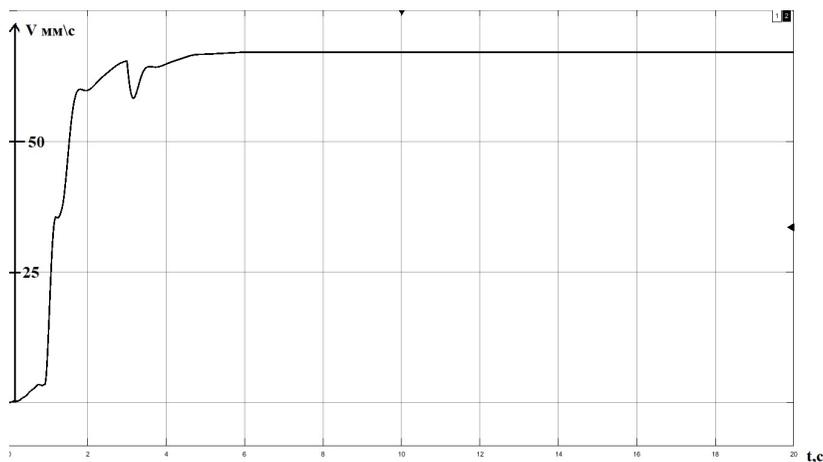


Рис. 8. Скорость вытяжки

Заключение

Показано, что для компенсации помех, возникающих в процессе глубокой вытяжки, наиболее целесообразной является разработка адаптивной САУ с моделью, которая обеспечивает инвариантность по отношению ко всем помехам.

Представлена методика синтеза САУ компенсации возмущающих воздействий, которая за счет разницы между предписанным значением усилия вытяжки и его реальным значением формирует управляющее воздействие в контур регулирования скорости движения пуансона. За счет регулирования скорости в процессе движения пуансона реализуется стабилизация усилия вытяжки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Третьяков А.В., Зюзин В.И.* Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. – М.: Машиностроение, 1973. – 224 с.
2. Ковка и штамповка: Справочник в 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / Под ред. *А.Д. Матвеева*. – М.: Машиностроение, 1987. – 544 с.
3. *Кункин С.Н., Мамутов А.В., Мамутов В.С.* Технологические методы листовой штамповки: учеб. пособие. – СПб, 2018. – 52 с.
4. *Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю.* Технология холодной штамповки. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
5. *Корольков В.И., Зубарев В.Ю.* Технология изготовления металлических сильфонов ротационной вытяжкой // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12 (33). – № 1(2). – С. 353–356.
6. *Лысов В.Е., Каплун Е.С.* Структурно-графическое представление процесса глубокой вытяжки как объекта системы автоматического управления // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2013. – № 1(37). – С. 209–214.
7. *Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. и др.* Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. – М.: Альянс, 2011. – 423 с.
8. *Рапопорт Э.Я.* Системы подчиненного регулирования электроприводов постоянного тока: Конспект лекций. – Куйбышев, 1985. – 55 с.
9. *Анучин А.С.* Системы управления электроприводов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2015. – 373 с.
10. *Лысов В.Е.* Теория автоматического управления. – М.: Машиностроение, 2010. – 500 с.
11. *Лысов В.Е., Сидоров И.С.* Анализ влияния частоты квантования цифрового регулятора положения позиционно-слеящего электропривода на динамические показатели качества управления // Мехатроника. Автоматизация. Управление. – 2016. – Т. 17. – № 10. – С. 685–689.

Статья поступила в редакцию 20 июля 2021 г.

ADAPTIVE SYSTEM FOR AUTOMATIC CONTROL OF THE FINE DRAWING PROCESS

*V.E. Lysov, A.P. Sinyukov**

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: epa@samgtu.ru

Abstract. *The paper considers the technological process of deep drawing, taking into account the high degree of deformation of the metal and the small thickness (0.5 mm) of the workpiece. Given the high complexity of the process and the impossibility of its representation in an analytical form, the paper uses its representation in the form of a phase portrait in the plane of the drawing force and movement of the hydraulic press punch. Phase trajectories in the mentioned plane determine the geometric dimensions of the product, characterize stresses and deformations during the process and determines the structure of the process control algorithm. The digital positional tracking system considered in the work includes electromechanical, hydraulic, pneumoelectric and electronic links. The system provides precision positioning of the hydraulic press punch with control and control of its movement speed. The paper provides an ideal mathematical model of the extraction process. As a result of comparing the phase trajectories of the model and the real process, a possible difference is revealed due to the interference in the real process. The resulting difference makes it possible to form an additional control effect on the punch speed control circuit in the system in order to compensate for the resulting misalignment. Thus, the stabilization of the drawing force in the function of the movement of the punch is realized. The paper provides mathematical descriptions of all parts of the system, provides dynamic characteristics of the process. As disturbing effects on the drawing process, the following are considered: metal hardening, the unstable friction force that occurs when the workpiece is pressed, the change in the drawing force when the parts of the workpiece are drawn into the matrix, corrugation, metal thinning during the transition of the bottom part to the side wall of the product. The mentioned disturbances without the system in question did not fully ensure the quality of the products. As a result of the resulting marriage, significant production costs took place. The materials of the work and numerical data of the links of the technological process system were obtained by the example of manufacturing a cylinder of an OP-2(3)-ABCE powder fire extinguisher produced at the ZPO plant Itself (fire fighting equipment plant).*

Keywords: *deep drawing, transfer function, process model, punch speed control circuit, pneumatic positioner, lag, transmission coefficient of system links.*

REFERENCES

1. *Tret'yakov A.V., Zyuzin V.I.* Mekhanicheskie svoystva metallov i splavov pri obrabotke davleniem. M.: Mashinostroenie, 1973. 224 s.
2. *Kovka i shtampovka. Spravochnik v 4-h tomah. T. 4. Listovaya shtampovka.* Pod red. *A.D. Matveeva.* M.: Mashinostroenie, 1987. 544 s.
3. *Kunin S.N., Mamutov A.V., Mamutov V.S.* Tekhnologicheskie metody listovoj shtampovki. SPb, 2018. 52 s.
4. *Averk'ev Yu.A., Averk'ev A.Yu.* Tekhnologiya holodnoj shtampovki. M.: Mashinostroenie, 1989. 304 s.

* *Vladimir E. Lysov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Andrey P. Sinyukov, Graduate Student.*

5. *Korol'kov V.I., Zubarev V.Yu.* Tekhnologiya izgotovleniya metallicheskih sil'fonov rotacionnoj vytyazhkoj // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk.* Samara. T. 12 (33), № 1(2), 2010. S. 353–356.
6. *Lysov V.E., Kaplun E.S.* Strukturno-graficheskoe predstavlenie processa glubokoj vytyazhki kak ob"ekta sistemy avtomaticheskogo upravleniya // *Vestnik SamGTU. Seriya tekhnicheskie nauki,* 2013. № 1(37). S. 209–214.
7. *Bashta T.M., Rudnev S.S., Nekrasov B.B.* Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody. M.: Al'yans, 2011. 423 s.
8. *Rapoport E.Ya.* Sistemy podchinennogo regulirovaniya elektroprivodov postoyannogo toka. Konspekt lekcij. Kujbyshev, 1985. 55 s.
9. *Anuchin A.S.* Sistemy upravleniya elektroprivodov. M.: Izd. dom MEI, 2015. 373 s.
10. *Lysov V.E.* Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. M.: Mashinostroenie, 2010. 500 s.
11. *Lysov V.E., Sidorov I.S.* Analiz vliyaniya chastoty kvanovaniya cifrovogo regulyatora polozheniya pozicionno-sledyashchego elektroprivoda na dinamicheskie pokazateli kachestva upravleniya // *Mekhatronika. Avtomatizaciya. Upravlenie.* 2016. 17(10). S. 685–689.