УДК 681.51:621.979.2
DOI: 10.36979/1694-500X-2026-26-8-58-64

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОПРЕССОМ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ ПОСТОЯННУЮ СКОРОСТЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЯ

А.К. Джаманкулов, К.А. Герман, Р.Н. Усманов

Аннотация. Рассматривается разработка автоматической системы управления гидравлическим прессом, обеспечивающей стабилизацию скорости деформирования изделия при обработке металлов давлением. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения качества получаемых изделий, улучшения их физико-механических характеристик и снижения влияния нестабильности нагрузки на процесс деформации. Предложены две схемы автоматического регулирования: система с гидравлической обратной связью и система с электрогидравлической обратной связью. Выполнен анализ принципов их работы, определены условия стабилизации скорости перемещения силового цилиндра, разработана математическая модель регулятора расхода. Получено дифференциальное уравнение второго порядка, описывающее динамику подвижного элемента регулятора. Проведен анализ устойчивости системы по характеристическому уравнению. Установлено, что применение обратных связей позволяет обеспечить стабилизацию скорости деформирования в пределах 90–95 % при изменении нагрузки. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании гидравлических прессов с повышенными требованиями к качеству обработки.

Ключевые слова: гидравлический пресс; автоматическая система управления; скорость деформирования; регулятор расхода; обратная связь; электрогидравлическая система; математическая модель; устойчивость; динамический режим.

ПРОДУКЦИЯНЫН ДЕФОРМАЦИЯСЫНЫН ТУРУКТУУ ЫЛДАМДЫГЫН КАМСЫЗ КЫЛУУ ҮЧҮН АВТОМАТТЫК ГИДРОПРЕССТИ БАШКАРУУ ТУТУМУН ИШТЕП ЧЫГУУ

А.К. Джаманкулов, К.А. Герман, Р.Н. Усманов

Аннотация. Бул макалада металлды калыптоо учурунда тетиктин деформация ылдамдыгын турукташтыруучу гидравликалык пресс үчүн автоматтык башкаруу системасын иштеп чыгуу талкууланат. Изилдөөнүн актуалдуулугу алынган тетиктердин сапатын жакшыртуу, алардын физикалык жана механикалык касиеттерин жакшыртуу жана жүктүн туруксуздугунун деформация процессине тийгизген таасирин азайтуу зарылдыгы менен аныкталат. Эки автоматтык башкаруу схемасы сунушталат: гидравликалык кайтарым байланышы бар система жана электрогидравликалык кайтарым байланышы бар система. Бул системалардын иштөө принциптери талданат, кубат цилиндринин ылдамдыгын турукташтыруу шарттары аныкталат жана агым жөнгө салгычынын математикалык модели иштелип чыгат. Жөнгө салгычтын кыймылдуу элементинин динамикасын сүрөттөгөн экинчи тартиптеги дифференциалдык теңдеме алынган. Системанын туруктуулугун талдоо мүнөздүү теңдемени колдонуу менен жүргүзүлөт. Кайтарым байланышты колдонуу жүктөр өзгөргөндө деформация ылдамдыгын 90–95 % чегинде турукташтырууга мүмкүндүк берери аныкталган. Алынган жыйынтыктарды иштетүү сапатына жогорулатылган талаптар менен гидравликалык прессterди долбоорлоодо колдонсо болот.

Түйүндүү сөздөр: гидравликалык пресс; автоматтык башкаруу системасы; деформация ылдамдыгы; агым контроллери; кайтарым байланыш; электрогидравликалык система; математикалык модель; туруктуулук; динамикалык режим.

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR A HYDRAULIC PRESS ENSURING A CONSNANT WORKPIECE DEFORMATION RATE

A.K. Djamankulov, K.A. German, R.N. Usmanov

Abstract. This article discusses the development of an automatic control system for a hydraulic press that stabilizes the deformation rate of a part during metal forming. The relevance of the study is determined by the need to improve the quality of the resulting parts, enhance their physical and mechanical properties, and reduce the impact of load instability on the deformation process. Two automatic control schemes are proposed: a system with hydraulic feedback and a system with electro hydraulic feedback. The operating principles of these systems are analyzed, the conditions for stabilizing the speed of the power cylinder are determined, and a mathematical model of the flow regulator is developed. A second-order differential equation is derived that describes the dynamics of the moving element of the regulator. An analysis of the system stability is conducted using the characteristic equation. It is established that the use of feedback allows for stabilization of the deformation rate within 90–95 % with changing loads. The obtained results can be used in the design of hydraulic presses with increased requirements for processing quality.

Keywords: hydraulic press; automatic control system; deformation rate; flow controller; feedback; electro hydraulic system; mathematical model; stability; dynamic mode.

Введение. Обработка металлов давлением является одним из наиболее распространённых технологических процессов в машиностроении, обеспечивающим получение изделий с высокими физико-механическими характеристиками, улучшенной структурой материала и рациональным использованием металла. К числу основных видов оборудования для реализации данного процесса относятся гидравлические прессы, отличающиеся высокой энергоёмкостью и возможностью создания значительных усилий деформирования.

Одним из ключевых параметров процесса обработки металлов давлением является скорость деформирования. От характера изменения скорости зависит формирование структуры материала, распределение напряжений, степень упрочнения и качество готового изделия. Нестабильность скорости перемещения рабочего органа гидропресса приводит к ухудшению точности обработки, изменению механических свойств материала и повышению процента брака.

В связи с этим возникает необходимость разработки автоматических систем управления, способных компенсировать влияние изменяющейся нагрузки и обеспечивать постоянство скорости деформирования изделия.

Исследованиями профессоров А.В. Лясникова, Д.П. Кузнецова и других учёных установлено, что при обеспечении постоянной скорости деформирования изделия при обработке металлов давлением повышается качество его изготовления, прочность, износостойкость и правильность формирования кристаллической решётки [1, 2].

В работе разработаны две автоматические системы, стабилизирующие скорость деформирования изделия в процессе его обработки: первая система – это автоматическая система управления регулирования режимов работы гидропресса с обратной гидравлической связью, которая обеспечивает постоянство скорости деформирования; вторая система – автоматическая система регулирования режимов работы гидравлического пресса, с использованием обратной электрогидравлической связью.

Материалы и методы исследования. Представлена принципиальная схема автоматического регулирования скорости деформирования заготовки с гидравлической обратной связью (рисунок 1).

Для обеспечивания стабильной скорости перемещения штока гидропресса используется следующий алгоритм; при увеличении давления насоса P_H растет расход жидкости в силовом цилиндре $Q_{\#''}$, что уменьшает скорость перемещения поршня. Вместе с тем повышенное давление в канале обратной связи воздействует на торец клапана регулятора расхода (2), смещая его вправо. Проходная щель регулятора расхода при этом изменяется на $\triangle h$ и в систему подаётся дополнительный расход, компенсирующий утечки. Таким образом обеспечивается стабильная скорость деформации металла на гидропрессе.

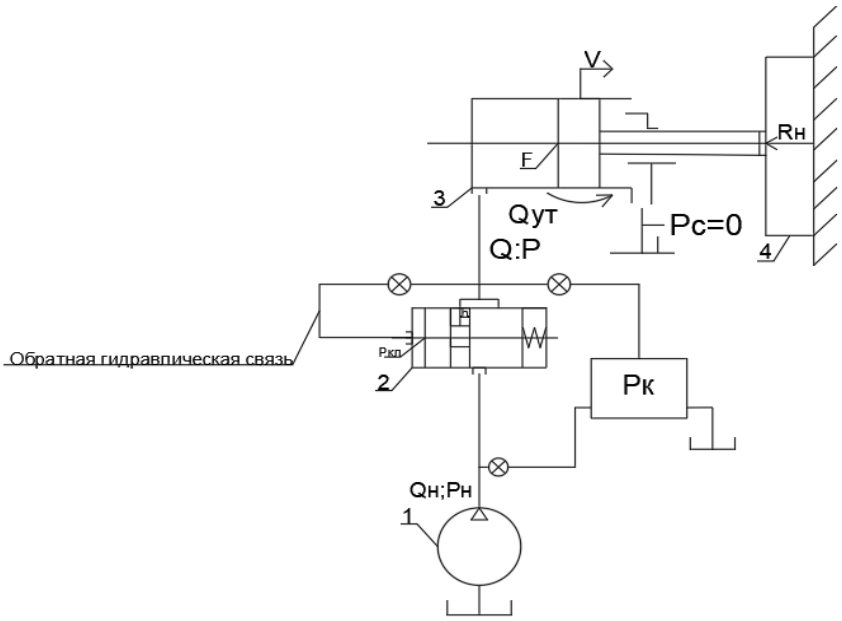


Рисунок 1 – Схема автоматического управления регулирования скорости:

1 – насос с постоянной производительностью; 2 – регулятор расхода; 3 – силовой цилиндр гидравлического пресса; 4 – деталь (изделие); P_K – редукционный клапан (Г-57), подключённый параллельно регулятору расхода; $\triangle P = P_H - P = const$ – постоянный перепад давления; Q_H – расход рабочей жидкости, поступающей в силовой цилиндр; P_H – давление насоса; F – рабочая площадь поршня; P_c – давление в канале слива; v – скорость деформации

Автоматическая система управления режимами работ гидравлического пресса, с обратной электрогидравлической связью представлена на рисунке 2.

По мере деформирования детали нагрузка R_H на гидропресс возрастает, провоцируя увеличение давления в рабочей полости силового цилиндра $Q_{\#''}$. В результате увеличиваются внутренние утечки жидкости, и поршень начинает двигаться медленнее. В этот же момент установленный датчик *Д* преобразует измеряемое давление в электрический сигнал $U_Д$. Данный импульс, наряду с сигналом U_0 от задающего программного устройства (ЗПУ), поступает в сумматор для последующей обработки.

Так как поступающий от сумматора сигнал рассогласования обладает малой мощностью $U = U_Д - U_0$, он увеличивается в усилителе *У*. Модифицированный импульс передается на электромагнит, который приоткрывает щель регулятора расхода. Дополнительный объем рабочей жидкости, поступающий в полость силового цилиндра, компенсирует внутренние утечки, что в итоге стабилизирует скорость деформации обрабатываемого на гидропрессе изделия.

ЗПУ с помощью задающего сигнала U_0 может настраивать автоматическую систему на любые режимы работ гидропресса в зависимости от материала обрабатываемого изделия.

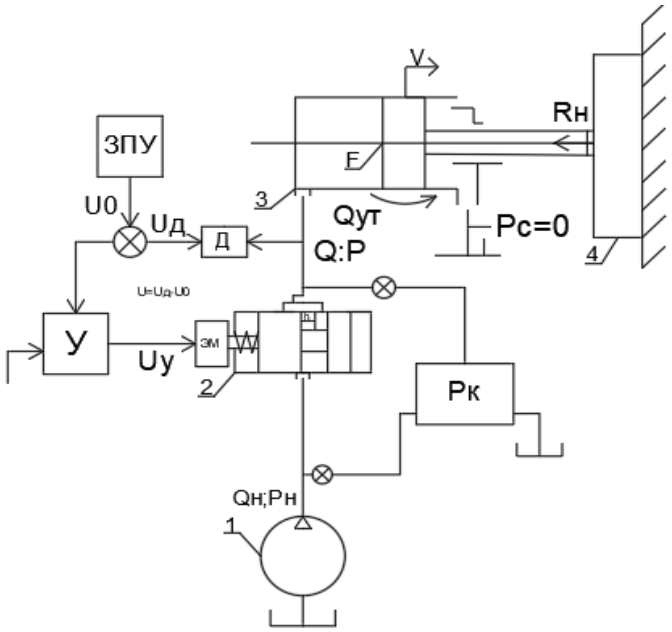


Рисунок 2 – Автоматическая система управления гидравлического пресса:

1 – насос с постоянной производительностью; 2 – регулятор расхода; 3 – силовой цилиндр; 4 – деталь; *Д* – датчик; ЗПУ – задающее программное устройство; U_0 – задающий сигнал; $U_Д$ – сигнал датчика; $U = U - U_0$ – сигнал рассогласования; *У* – усилитель; U_y – усиленный сигнал; *ЭМ* – электромагнит

Расчёт параметров регулятора. При стабильной скорости поршня силового цилиндра гидропресса выполняется условие [3]:

$$K_{УТ} \cdot \frac{\Delta R_H}{p^2} = k_З \Delta h.$$

Для схемы 1: $\triangle P \cdot \frac{\pi d^2}{4} = c \triangle h$, (1)

где $\triangle P$ – приращение давления в канале обратной связи;

c – коэффициент жёсткости пружины.

Для схемы 2: $\triangle F_{ЭМ} = c \triangle h$, (2)

где $\triangle F_{ЭМ} = K_{ЭМ} \cdot I^2$,

$K_{ЭМ}$ – коэффициент, учитывающий конструктивные параметры электромагнита.

Формулы (1) и (2) позволяют произвести расчет коэффициента жесткости пружин регуляторов расхода щели для стабилизации скорости деформирования изделия при обработке металлов давлением на гидропрессе.

Расчет гидропривода с обратной гидравлической связью. Гидравлическая система формируется на базе стандартных элементов гидроаппаратуры. Исключение составляет регулирующий клапан, конструкция которого определяется после выбора оптимальных размеров и параметров на основе результатов динамических исследований [4].

Анализ работы системы проводится при заданных значениях масс подвижных частей, действующих на шток силового цилиндра:

M_1 = 200 кг и M_2 = 1000 кг. *По предыдущим формулам рассчитаем коэффициенты относительного демпфирования, которые принимают следующие значения:*

$$\xi_{11} = 1,603; T_{11} = 3,162 \cdot 10^{-4} c;$$

$$\xi_{12} = 3,565; T_{12} = 7,071 \cdot 10^{-4} c;.$$

Определение параметров регулирующего клапана – коэффициента демпфирования ξ_2 и постоянной времени T_2 – выполняется исходя из условия минимальной продолжительности переходного процесса.

Определим переходный процесс в клапане, при этом принимается значение $K_2 = 1$ для различных сочетаний ξ_2 и T_2. Расчёт времени переходного процесса осуществляется с использованием вычислительной техники.

Далее рассмотрим математическую модель работы данного устройства.

Для обеспечения адекватности математической модели необходимо выполнение следующих условий [5]:

1. Корректное составление принципиальной схемы устройства.

2. Обоснованный выбор факторов физического процесса, учитываемых или игнорируемых при моделировании работы устройства.

Рассмотрим принципиальную схему регулятора расхода (рисунок 3).

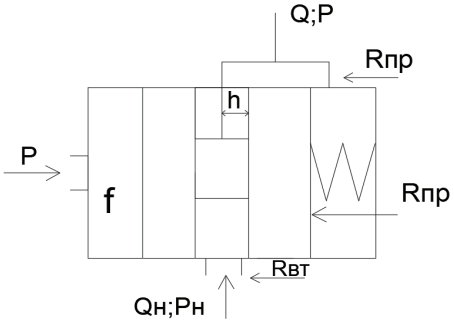


Рисунок 3 – Схема регулятора расхода

Обоснование учёта и пренебрежения факторов, присутствующих при работе регулятора расхода.

Учитываем: силы инерции, вязкого трения и пружины; пренебрегаем осевой составляющей гидродинамической силы потока жидкости в связи с тем, что расход жидкости на подачу инструмента незначителен, также пренебрегаем изменениями вязкости рабочей жидкости поскольку объём бака большой в системе, то в нем отводится тепло.

На основании принципа Даламбера составляем уравнение динамики для действующих сил на подвижный элемент регулятора [6].

$$Pf = m\frac{d^2h}{dt^2} + \alpha\frac{dh}{dt} + ch, \quad (3)$$

где P – давление в рабочей полости силового цилиндра;

F – площадь торца подвижного элемента регулятора расхода;

h – величина открытия рабочей щели;

m – масса подвижного элемента регулятора расхода;

α – коэффициент вязкого трения, зависящий от сорта рабочей жидкости гидравлической системы;

c – коэффициент жесткости пружины.

Для решения уравнения 3 разделим обе части на коэффициент жесткости пружины c.

$$\frac{m}{c}\frac{d^2h}{dt^2}+\frac{\alpha}{c}\frac{dh}{dt}+h=\frac{f}{c}P\,.$$

Введем ее обозначения:

$$T_K=\sqrt{\frac{m}{c}}\;;\;T_Д=\frac{\alpha}{c};\;\;K_P=\frac{f}{c}\,.$$

Таким образом уравнение примет следующий вид:

$$T_K^2\frac{d^2h}{dt^2}+T_L\frac{dh}{dt}+h=K_PP\,,$$

где T_K – постоянная времени, способствующая колебательному процессу в переходном режиме;

T – постоянная времени способствующая демпфированию колебаний переходного режима;

K_P – коэффициент усиления регулятора.

Таким образом, регулятор расхода был описан математической моделью на основе дифференциального уравнения второго порядка.

Для установления вида переходного процесса необходимо определить корни характеристического уравнения:

$$T_K^2p^2+T_Д+1=0.$$

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

Если корни характеристического уравнения вещественные и отрицательные, то переходной процесс регулятора расхода будет идти по двум экспонентам.

При условии $T_Д\angle 2T_K$ колебательный процесс может привести к неустойчивой работе.

Доказательством устойчивой работы регулятора расхода являются: положительность коэффициентов при переменных в левой части уравнения, а также отрицательность и вещественность корней характеристического уравнения (рисунок 4).

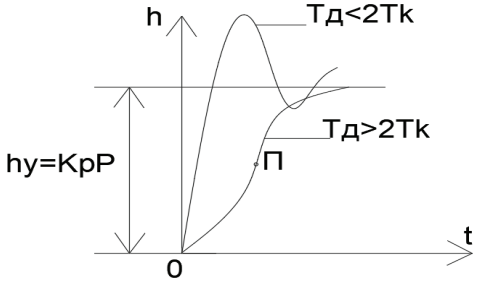


Рисунок 4 – Переходной процесс регулятора расхода

Разработанная математическая модель позволяет рассчитать конструктивные и режимные параметры регулятора расхода, необходимые для его проектирования и изготовления. Кроме того, она служит для определения динамических характеристик устройства, а также характера и длительности переходного процесса, подтверждающих устойчивость его работы.

В работе [7] указана возможность интеграции SCADA-систем в структуру АСУ, что является задачей оптимизации данной работы с новыми возможностями.

В связи с указанными возможностями, можно рассмотреть вопрос интегрирования систем управления технологическим процессом и на другие области, где применяется технологическое оборудование, в частности в приготовительном отделе ткацкого производства. Например, для получения сновальной паковки с заданным напряженным состоянием [8], где применяются механические авторегуляторы тормозных систем.

Выводы:

1. Разработаны две автоматические системы управления гидравлическим прессом, обеспечивающие стабилизацию скорости деформирования изделия: с гидравлической и электрогидравлической обратными связями.

2. Разработана математическая модель работы регулятора расхода, учитывающая инерционные и другие факторы, на основании которой получено дифференциальное уравнение второго порядка.

3. Проведён анализ устойчивости системы по характеристическому уравнению, определены условия апериодического и колебательного режимов работы.

4. Установлено, что при корректном выборе параметров регулятора обеспечивается стабилизация скорости деформирования в пределах 90–95 % в процессе изменения нагрузки.

Поступила: 22.06.2026; рецензирована: 06.07.2026; принята: 08.07.2026.

Литература

1. *Марченко А.В.* Обработка металлов давлением / А.В. Марченко. М.: Машиностроение, 2010. 512 с.
2. *Кузнецов Д.П.* Механика пластической деформации металлов / Д.П. Кузнецов. СПб.: Политехника, 2003. 380 с.
3. *Башта Т.М.* Гидравлика и гидропривод / Т.М. Башта. М.: Машиностроение, 2008. 496 с.
4. *Штейнберг В.В.* Гидравлические машины и приводы / В.В. Штейнберг. М.: Машиностроение, 2009. 448 с.
5. *Смирнов Т.А.* Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением / Т.А. Смирнов. М.: Машиностроение, 2002. 360 с.
6. *Муслимов А.П.* Проектирование гидравлических систем машин / А.П. Муслимов. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2006. 164 с.
7. *Жикеев А.А.* Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП) / А.А. Жикеев, Д.Т. Алдашева, А. Жаксылыкова // Вестник Северо-Казахстанского ун-та им. Манаша Козыбаева. 2022. № 1 (53). URL: https://doi.org/10.54596/2309-6977-2022-1-157-160.
8. *Джаманкулов А.К.* Формирование сновальной паковки с заданным напряженным состоянием / А.К. Джаманкулов, К.А. Герман // Вестник КРСУ. 2025. Т. 25. № 12. С. 46.