

УДК 681.513.675

А.А. АНДРУСЕНКО, Г.В. КУЛИНЧЕНКО

Шосткинський інститут Сумського Державного університету, Україна

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассматривается комплексная математическая модель процесса прессования многокомпонентного порошкового материала пирозамедлителя электродетонаторов на гидравлическом прессе, описываемая дифференциальными уравнениями в частных производных. Определены общесистемные каналы управления и выполнен синтез интегральной схемы моделирования системы прессования. Проведена экспериментальная проверка характеристик разработанной математической модели для оценки ее адекватности, что позволяет синтезировать систему управления прессованием на реальном объекте.

Ключевые слова: математическая модель, система управления, прессование, алгоритм, электродетонатор.

Введение

Построение алгоритмов управления базируется на конкретном описании объекта управления (ОУ) и в зависимости от детальности описания формируется структура модели системы управления [1, 2]. Классическим подходом к процессу управления прессованием, по критерию стабилизации параметров исходного продукта, является исследование характеристик установок прессования [3, 4], которые позволяют достичь заданных динамических характеристик при заданных требованиях к устойчивости системы. Альтернативным направлением решения задачи стабилизации скорости перемещения пуансона пресс-матрицы является непосредственный мониторинг плотности порошкового материала (ПМ) и линейной скорости перемещения пуансона [5, 6]. Существующие модели управления процессом прессования порошковых смесей [3, 4] позволяют достаточно точно отразить работу гидравлической схемы установки прессования, а в работах [5, 6] показаны модели прессования порошкового материала непосредственно в пресс-матрице не учитывающие электрогидравлические параметры установки прессования.

В статье рассматривается комплексная модель управления прессованием в условиях априорной неопределённости, обусловленной изменчивостью исходной композиции прессования и нелинейностью ОУ.

Комплексная модель управления прессованием

Рассматривая пути решения сформулированной задачи следует отметить, что использование проблемно-ориентированных комплексов требует дополнительных затрат, поэтому приемлемым вари-

антом является разработка объектно-ориентированного программного обеспечения управления установкой прессования с использованием комплексной модели системы.

На предыдущих этапах исследований получена модель процесса прессования пирозамедлителей электродетонаторов (ЭД) [6]. При этом было принято допущение, что в процессе прессования обеспечивается минимизация изменений плотности распределения ПМ по высоте ЭД.

Для оценки возможности синтеза комплексной модели управления процессом прессования пирозамедлителей ЭД, учитывающей произвольные начальные условия формирования ПМ, выполним анализ схемы процесса прессования [7], схема которого представлена на рис. 1.

Как видно из рис. 1 результат прессования представляет собой неоднородную по плотности смесь. Поскольку колпачок ЭД является цилиндрическим телом, то целесообразно распределение ПМ в колпачке пирозамедлителя ЭД описать в цилиндрических координатах:

$$\rho(r, \phi, z, F_{\text{ПР}}, t) = E(F_{\text{ПР}}) \frac{\partial \psi(r, \phi, z, t)}{\partial z} + \eta \frac{\partial^2 \psi(r, \phi, z, t)}{\partial t \partial z}, \quad (1)$$

где $\rho(r, \phi, z, t)$ - давление в сечении r, ϕ, z ;

$\psi(r, \phi, z, t)$ - функция изменения плотности смеси в сечении r, ϕ, z ;

η - коэффициент динамической вязкости смеси;

$E(F_{\text{ПР}})$ - модуль упругости смеси.

Спецификой прессования исследуемых ПМ является нелинейная зависимость модуля упругости E от усилия прессования (рис. 2).

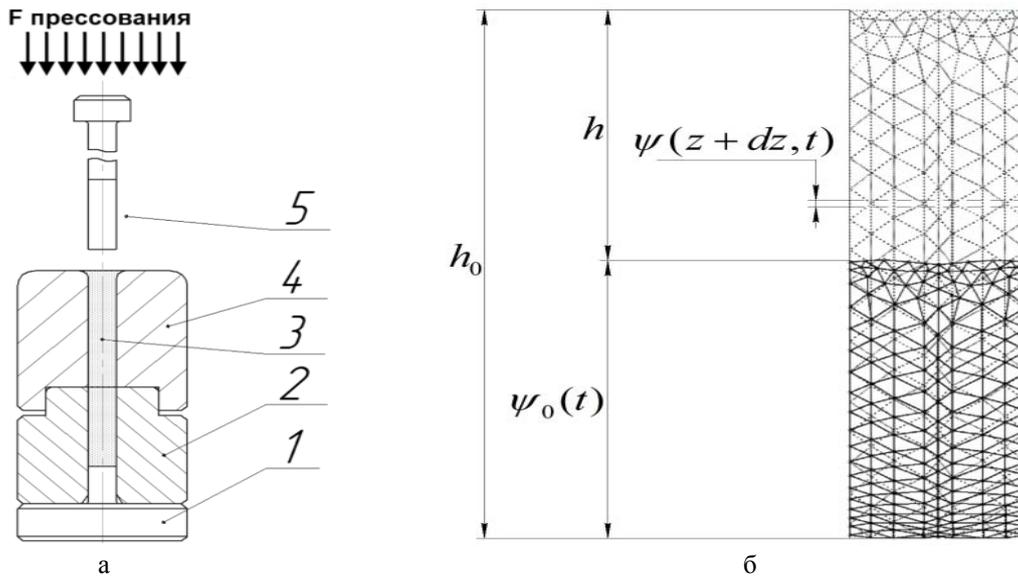


Рис. 1. Схема процесса прессования: а – инструмент для прессования: 1-поддон; 2-матрица; 3-многокомпонентная смесь ПМ; 4-направляющая; 5-пуансон; б – образец пирозамедлителя после прессования: h_0 - высота засыпки ПМ; h - высота запрессовки ПМ; $\psi(z + dz, t)$ - функция приращения сжатия смеси; $\psi_0(t)$ - функция сжатия смеси; z - координата перемещения пуансона

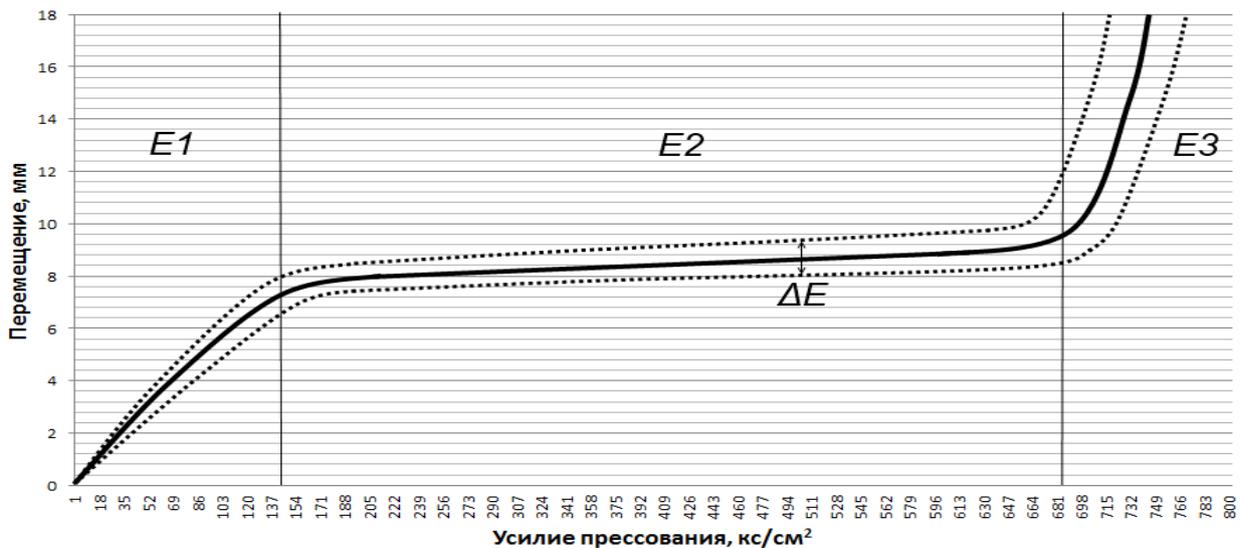


Рис. 2. График зависимости деформации от усилия прессования

График зависимости деформации от усилия прессования характеризуется тремя специфическими участками, которым соответствуют различные значения модуля Юнга (E_1, E_2 и E_3).

Первый участок (E_1) характеризуется упругой деформацией, второй (E_2) – пластической и третий (E_3) – описывает этап внутреннего разрушения пирозамедлителя ЭД.

Описание поведения модуля упругости E для смеси ПМ усложняется тем, что модуль E изменяется от партии к партии в зависимости от состава смеси.

На элементарный слой смеси dz площадью S действует следующая система сил

$$F(r, \phi, z, t) - F(r, \phi, z, dz, t) - F_{TP}(r, \phi, z, t) = -ma, \quad (2)$$

где $F = pS$ – сила сжатия ПМ;

F_{TP} – сила трения слоя ПМ о стенки пресс-матрицы;

$$a = \frac{\partial^2 \psi(r, \phi, z, t)}{\partial t^2} - \text{ускорение слоя } dz \text{ ПМ;}$$

$$m = \rho S dz - \text{масса ПМ;}$$

ρ - плотность ПМ.

Сила трения равна

$$F_{TP}(x, y) = f(x, y)N,$$

где $f(x, y)$ – коэффициент трения ПМ о стенки пресс-формы, который зависит от расстояния между участком смеси ПМ и пресс-матрицей и уменьшается с увеличением расстояния от участка смеси ПМ до стенок пресс-формы;

N – сила нормального давления на стенку пресс-матрицы.

Сила нормального давления равна

$$N = p_{бок} S_{бок},$$

где $p_{бок} = \zeta \cdot p$ – давление ПМ на стенки пресс-матрицы;

$S_{бок} = l_{окр} dz$ – площадь боковой поверхности слоя dz ;

ζ – коэффициент давления ПМ на стенки пресс-матрицы;

$l_{окр} = S / R$ – длина окружности пресс-матрицы;

R – гидравлический радиус пресс-формы.

В итоге получим выражение для силы трения

$$F_{тр}(x, y) = \frac{f(x, y)\zeta}{R} p S dz. \quad (3)$$

Уравнение (2) после подстановки выражения (3) примет вид

$$\begin{aligned} S(p(r, \phi, z, t) - p(r, \phi, z + dz, t)) - \\ - \frac{f(x, y)\zeta}{R} p(r, \phi, z, t) S dz = \\ = -\rho S \frac{\partial^2 \psi(r, \phi, z, t)}{\partial t^2} dz. \end{aligned} \quad (4)$$

После преобразования получим

$$\frac{dp(r, \phi, z, t)}{dz} + \frac{f(x, y)\zeta}{R} p(r, \phi, z, t) = \rho \frac{\partial^2 \psi(r, \phi, z, t)}{\partial t^2}. \quad (5)$$

Учитывая, что многокомпонентная смесь ПМ представляет собой упругую среду (1), то математическая модель прессования в пресс-матрице примет вид :

$$\begin{aligned} E \frac{\partial^2 \psi(r, \phi, z, t)}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 \psi(r, \phi, z, t)}{\partial z^2 \partial t} + \frac{f(x, y)\zeta}{R} \cdot \\ \cdot \left(E \frac{\partial \psi(r, \phi, z, t)}{\partial z} + \eta \frac{\partial^2 \psi(r, \phi, z, t)}{\partial z \partial t} \right) = \\ = \rho \frac{\partial^2 \psi(r, \phi, z, t)}{\partial t^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Предполагая, что распределение плотности в элементарном слое пирозамедлителя ЭД изменяется незначительно, то изменением плотности по координате ϕ можно пренебречь. Это позволит описать модель процесса прессования ПМ в 2-х мерном виде по координатам (r, z) .

Математическую модель (6) процесса прессования ПМ можно представить в виде

$$\begin{aligned} E \frac{\partial^2 \psi(r, z, t)}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 \psi(r, z, t)}{\partial z^2 \partial t} + \frac{f(x, y)\zeta}{R} \left(E \frac{\partial \psi(r, z, t)}{\partial z} + \right. \\ \left. + \eta \frac{\partial^2 \psi(r, z, t)}{\partial z \partial t} \right) = \rho \frac{\partial^2 \psi(r, z, t)}{\partial t^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Откуда видно, что процесс прессования представляет собой объект с распределенными параметрами, описываемый дифференциальным уравнением в частных производных.

Решение уравнения (7) получено по методу конечных элементов [8].

Для оценки возможности реализации нелинейного алгоритма управления процессом прессования рассмотрим каналы управления установкой (рис. 3).

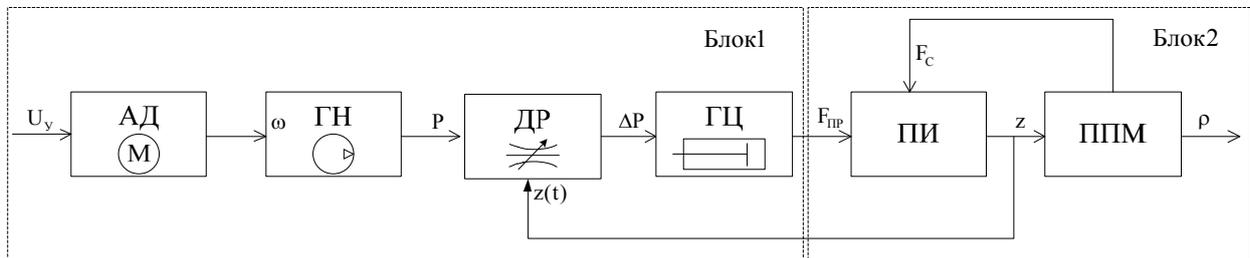


Рис. 3. Каналы управления установкой прессования:

U_y - управляющее воздействие; АД – асинхронный двигатель; ω – угловая скорость вращения АД;

ГН – гидравлический насос; P – давление создаваемое ГН; ДР – дроссель регулируемый;

ΔP – давление на выходе ДР; ГЦ – гидравлический цилиндр; $F_{тр}$ – усилие прессования;

ПИ - прессующий инструмент; z – координата перемещения ПИ;

ППМ - прессование ПМ; p – плотность ПМ

На рис. 3 управляющее воздействие в виде электрического сигнала U_y , подается на асинхронный двигатель АД вращающий гидравлический насос ГН, который создает давление P , поступающее на регулируемый дроссель ДР. Далее давление ΔP с выхода ДР подается в рабочую полость гидроцилиндра ГЦ, где преобразуется в усилие прессования $F_{ГЦ}$, которое воздействует на прессующий инструмент ПИ. Затем посредством перемещения ПИ реализуется функция прессования ПМ по координате z , результатом которого является изменение плотности ρ ПМ.

Описанная схема (рис.3) каналов управления установкой прессования может быть структурно разделена на два основных блока:

- блок 1 – модель установки прессования,
- блок 2 – модель прессования ПМ.

Основываясь на классических представлениях функциональных блоков схемы (рис. 3), можно путем преобразований получить схему моделирования установки прессования (рис. 4).

На структурной схеме (рис. 4):

коэффициент K_γ представляет собой коэффициент преобразования перемещения золотника гидравлического дросселя в угол поворота регулирующего органа гидропривода объемного управления $\gamma(s)$;

коэффициент K_K определяет количество колпачков пирозамедлителей прессуемых одновременно;
 S_K – площадь формуемой поверхности одного колпачка;

Q_H – номинальная производительность гидронасоса;

$S_{ГЦ}$ – рабочая площадь поршня гидроцилиндра;

γ_{max} – максимальное значение параметра регулирования гидронасоса;

V_H – объем жидкости в полости нагнетания;

$E_{УЖ}$ – объемный модуль упругости рабочей жидкости.

Результаты вычислительных экспериментов

Разработанная модель (рис. 4) моделировалась в среде Matlab, с целью получения переходных характеристик. Переходная характеристика процесса прессования пирозамедлителя ЭД на гидравлическом прессе, полученная как реакция структурной схемы на единичный скачок, представлена на рис. 5.

На рис. 6 представлена переходная характеристика процесса прессования пирозамедлителя ЭД полученная практическим путем.

Анализ графиков переходных характеристик (рис. 5, 6) позволяет сделать вывод, что расхождение модели процесса прессования пирозамедлителя ЭД на гидравлическом прессе от реальной переходной характеристики не превышает 5%.

Выводы

1. Разработана комплексная математическая модель процесса прессования пирозамедлителя ЭД на гидравлическом прессе, учитывающая произвольные начальные условия формирования порошкового материала.

2. Анализ переходной характеристики процесса прессования показал, что процесс является устойчивым, имеет апериодический характер изменения и разработанная математическая модель позволяет синтезировать систему управления прессованием пирозамедлителя ЭД.

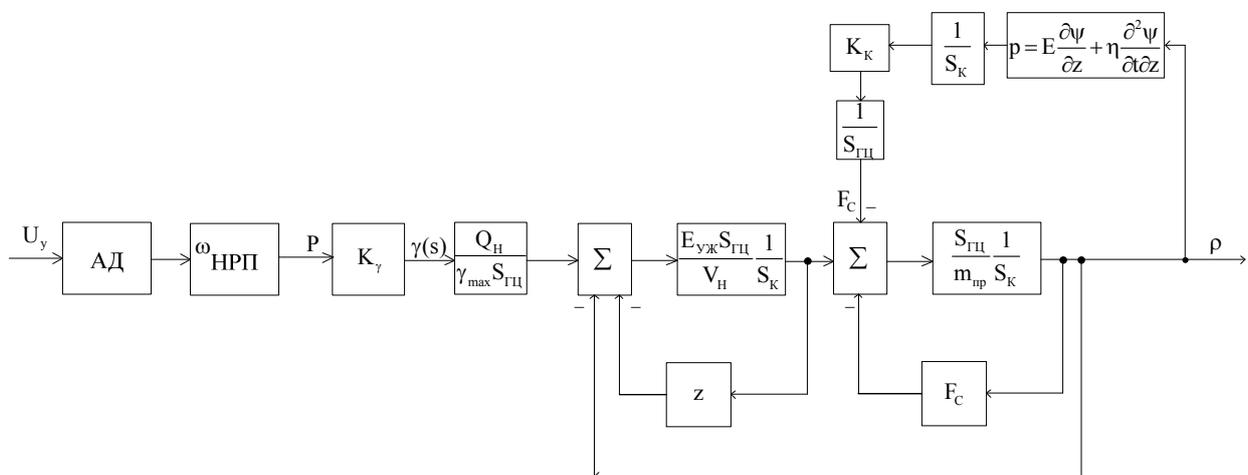


Рис. 4. Схема моделирования установки прессования

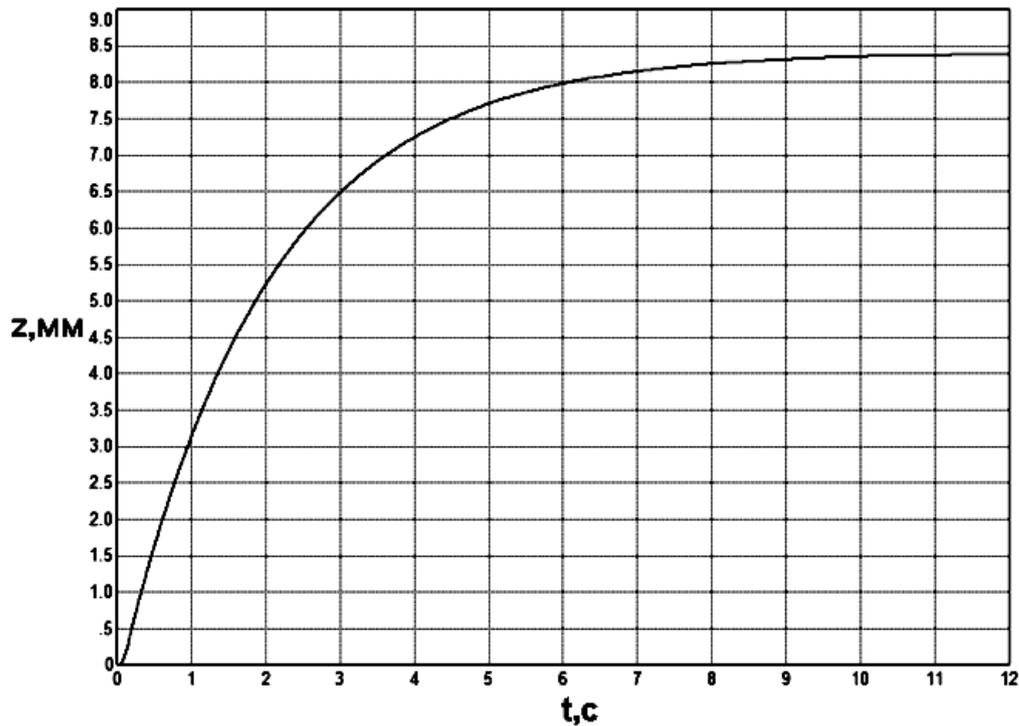


Рис. 5. Переходная характеристика процесса прессования пирозамедлителя ЭД по результатам моделирования

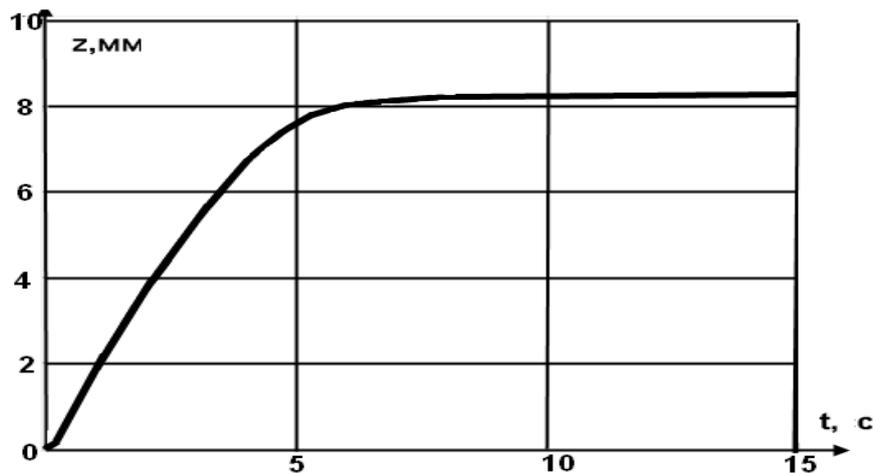


Рис. 6. Экспериментальная переходная характеристика процесса прессования

Литература

1. Усынин, С.П. Опыт создания автоматизированной системы управления взрывоопасным технологическим процессом. [Текст] / С.П. Усынин // СТА 3–2003. – СТА–ПРЕСС. – С. 34–39.
2. Соколов, А.В. Микроконтроллерная система управления прессы для калибровки торцев отводов и тройников [Текст] / А.В. Соколов, П.Г. Мазеин // Известия Челябинского научного центра. – 2004. – Вып. 1 (22). – С. 117–121.
3. Шавлович, З.А. Математическая модель гидравлического прессы с сервоусилителем типа С.100 [Текст] / З.А. Шавлович // Научно-техни-

ческие проблемы современного гидромашиностроения и методы их решения: Труды МНТК, 5–7 июня 2001 г. – СПб, 2001. – С. 125–128.

4. Андрусенко, А.А. Моделирование установки прессования [Текст] / А.А. Андрусенко, В.А. Багута, Г.В. Кулинченко // VIII Всеукраїнська науково-технічна конференція «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів». – Кременчук, 2009. – С. 196–197.

5. Potapenko, A.N. Modeling and Optimization Possibilities for the Process of Compaction of Objects with Cavities / A.N. Potapenko, A.G. Titov, E.A. Potapenko // In a book: Materials and Processing Trends for PM, Components in Transportation. –

Munich, Germany: EPMA, 2000. – V. 1. – P. 102 – 110.

6. Андрусенко, А.А. Моделирование процесса прессования порошковых материалов [Текст] / А.А. Андрусенко, Г.В. Кулинченко, Г.М. Худолей // VII Всеукраїнська науково-технічна конференція «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів». – Кременчук, 2008. – С. 58.

7. Андрусенко, А.А. Анализ распределения

плотности в колпачке электродетонатора [Текст] / А.А. Андрусенко, Г.В. Кулинченко // Міжнародна наукова конференція студентів, аспірантів та молодих вчених "Теоретичні та прикладні аспекти кібернетики". – Київ: «Викрек», 2011. – С. 258 – 260.

8. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы [Текст]: пер. с англ. / Р. Галлагер. – М.: Мир, 1984. – 428 с.

Поступила в редакцию 20.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, профессор, зав. каф. компьютерных наук А.С. Довбыш, Сумский государственный университет, Украина, Сумы, Украина.

МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ПРЕСУВАННЯ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

О.О. Андрусенко, Г.В. Кулинченко

Розглядається комплексна математична модель процесу пресування багатокомпонентного порошкового матеріалу піроуповільнювача електродетонатора на гідравлічному пресі, що описується диференціальними рівняннями в часткових похідних. Визначено загальносистемні канали управління і виконаний синтез інтегральної схеми моделювання системи пресування. Проведена експериментальна перевірка характеристик розробленої математичної моделі для оцінки її адекватності, що дозволяє синтезувати систему управління пресуванням на реальному об'єкті.

Ключові слова: математична модель, система керування, пресування, алгоритм, електродетонатор.

CONTROLLING MODEL OF THE PRESSING POWDER MATERIALS

A.A. Andrusenko, G.V. Kulichenko

Submitted transfer characteristic compaction process allow us to conclude that the process is stable and has an aperiodic character of the change and makes it possible synthesis control system of the pressing pyrotechnic inhibitor ED based on the developed mathematical model. The experimental verification characteristics of the developed mathematical model to estimate of its adequacy that the allows the synthesis of the control system pressing on the real object.

Keywords: model, system, control, presswork, algorithm, control channels.

Андрусенко Александр Александрович – ассистент кафедры системотехники и информационных технологий, Шосткинский институт Сумского Государственного университета, Шостка, Украина.

Кулинченко Георгий Васильевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры системотехники и информационных технологий, Шосткинский институт Сумского Государственного университета, Шостка, Украина, e-mail: heorhy@rambler.ru.