

УДК 681.621.510

А.А. АНДРУСЕНКО<sup>1</sup>, Г.В. КУЛИНЧЕНКО<sup>2</sup><sup>1</sup> Шосткинський інститут Сумського Государственного университета, Шостка, Україна<sup>2</sup> Сумський Государственный университет, Сумы, Україна

## СИНТЕЗ ЗАКОНА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

В работе на основании математической модели системы управления определена передаточная функция процесса прессования пирозамедлителя электродетонатора (ЭД). Для реализации оптимального режима прессования пирозамедлителя ЭД по заданному критерию методом разложения управляющего воздействия в ряд по ортогональным полиномам решается обратная задача динамики и синтезированы алгоритмы управления гидравлическим прессом. Получены структурная схема и соответствующая ей передаточная функция системы управления процессом прессования пирозамедлителя ЭД на гидравлическом прессе при управлении по положению и скорости перемещения прессующего матрицы в дискретной форме записи.

**Ключевые слова:** синтез, закон управления, прессование, передаточная функция, алгоритм.

### Введение

Прессование порошковых материалов (ПМ), как один из основных способов получения пирозамедлителей электродетонатора (ЭД), относится к многофакторным процессам, эффективности повышения точности работы систем автоматического управления, в которых может быть достигнута, при использовании многоканальных систем, работающих по принципу „грубого” и „точного” управления [1]. Первый, основной силовой канал в таких системах реализует весь диапазон регулирования выходной координаты и несет на себе основную силовую нагрузку. Второй канал имеет существенно меньшую мощность, но является быстродействующим каналом, который компенсирует ошибки основного силового канала и, таким образом, обеспечивает повышение точности регулирования.

Для реализации сформулированных задач управления требуется синтезировать аппаратно-программный комплекс (АПК), позволяющий решать задачи прессования ПМ.

Наиболее распространенные на данный момент методы синтеза многоканальных систем оптимальных по квадратичным критериям качества рассмотрены в работах [1, 2]. Такие регуляторы позволяют получить высокие динамические характеристики при известных моделях многоканальной системы и внешних воздействий. В тоже время в работе [3] показано, что наличие нелинейных элементов и упругих звеньев в кинематических звеньях многоканальных систем сдерживают получение высокой

точности, потенциально присущей таким системам, что обуславливает решение указанных задач в цифровой форме.

### Постановка задачи исследования

Повышение точности многоканальных систем сдерживается наличием нелинейных эффектов. Наибольшее влияние на точность работы системы управления прессованием пирозамедлителя ЭД оказывает одновременное влияние нелинейных эффектов гидравлической системы пресса совместно с упругими свойствами прессуемых порошковых материалов. При работе системы прессования пирозамедлителя ЭД в реальных условиях отработки задающих либо компенсации возмущающих воздействий, требующих движения исполнительных механизмов многоканальных систем на малых скоростях, нередко возникают скачкообразные движения, остановки, автоколебания и т.д., хотя при разработке системы условия устойчивости заведомо выполнялись [2-3]. Это объясняется тем, что при синтезе системы использовались линейные модели каналов и идеализированная характеристика модели трения.

Таким образом, задача исследования сводится к оценке возможности реализации нелинейного алгоритма управления многоконтурной системой прессования пирозамедлителя ЭД.

В процессе синтеза многоканальных систем управления установками прессования порошковых материалов необходимо принимать во внимание тот факт, что при работе на малых скоростях перемеще-

ния поршня проявляются нелинейности в характеристике внешнего трения, что в свою очередь, обуславливает положительную обратную связь в системе. Более того, при работе на больших скоростях перемещений, целесообразно учитывать горизонтальный и восходящий участки в характеристике внешнего трения, так как системы, синтезированные с учетом падающего участка, в линейном приближении при работе с большой скоростью на горизонтальном и восходящем участках, обладают излишней инерционностью [5].

Рассматриваемая многоканальная система оптимального управления установкой прессования пирозамедлителя ЭД с учетом нелинейностей и упругих свойств ПМ характеризует достаточно широкий класс многоканальных систем, работающих по принципу грубого и точного управления, у которых нелинейные элементы могут быть аппроксимированы аналитическими нелинейностями в виде степенных рядов по векторам состояния и управления [3]. С учетом вышесказанного представляется возможным решение поставленной задачи синтеза закона оптимального управления процессом прессования ПМ.

### Решение задачи

Одним из наиболее важных параметров процесса прессования пирозамедлителя ЭД является удельное давление прессования, которое, однако, не является универсальной характеристикой процесса и прессовочного оборудования. Такое положение обусловлено разнообразием конструкций, прессформ и видами прессуемых изделий, которые имеют разные соотношения геометрических размеров (площади приложения нагрузки и высоты изделия), неодинаковое время приложения усилия и различные скорости прессования. Так, при изготовлении пирозамедлителя ЭД может выполняться до 10 загрузок замедляющей порошковой смеси в прессформу, естественно этот фактор делает понятие удельного давления прессования для качественных сравнительных оценок процесса неэффективным. Наиболее приемлемой характеристикой, учитывающей особенности процесса прессования пирозамедлителя ЭД [6], является равномерность распределения плотности ПМ. Именно этот параметр оказывает определяющее влияние на точность и надежность срабатывания ЭД [7].

Поскольку плотность на отдельно взятом единичном слое ПМ пропорциональна давлению в сечении  $\rho(r, \varphi, z, t)$  в момент времени  $t$  (1), то в качестве алгоритма оптимального управления процессом прессования ПМ будем считать такой закон пере-

мещения пуансона, который обеспечивает минимум отклонения плотности  $\rho$  от среднего значения.

Этот принцип может быть реализован на основании анализа следующих переменных [6]:

- по положению прессующего пуансона;
- по скорости прессующего пуансона;
- по положению и скорости перемещения прессующего пуансона.

В соответствии с указанными переменными, которые характеризуют процесс прессования пирозамедлителя ЭД на гидравлическом прессе, реализована структурная схема этого процесса, представленная на рис. 1.

На структурной схеме (рис. 1) коэффициент  $K_\gamma$  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;  $\gamma_{\max}$  - максимальное значение параметра регулирования гидронасоса;  $V_H$  - объем жидкости в полости нагнетания;  $E_{УЖ}$  - объемный модуль упругости рабочей жидкости.

Рассмотрим двухконтурную систему автоматического управления процессом прессования пирозамедлителя ЭД на гидравлическом прессе, построенную по принципу управления по положению и скорости перемещения прессующего пуансона, как потенциально более эффективную [1] (рис. 2).

Передаточные функции  $W_{РЕГП}(s)$ ,  $W_{РЕГС}(s)$ ,  $W_{ГП}(s)$ ,  $K_{ОСП}$  и  $K_{ОСС}$  структурной схемы (рис. 2) представляют собой соответствующие передаточные функции регулятора положения, регулятора скорости, процесса прессования пирозамедлителя ЭД на гидравлическом прессе при управлении по положению и скорости перемещения прессующей матрицы, датчика положения и датчика скорости соответственно.

По переходной характеристике (рис. 4) системы автоматического управления процессом прессования можно сделать вывод, что время переходного процесса больше времени процесса прессования пирозамедлителя и как следствие качество переходной характеристики является неудовлетворительным. С целью улучшения параметров переходного процесса системы и решения задачи оптимизации параметров управления введем ПИД.

При синтезе параметров настройки регулятора положения пресс-матрицы структурная схема (рис. 2) преобразуется в структурную схему (рис. 3), причем передаточная функция датчика обратной связи по положению будет равна  $K_{OC} = 80 \cdot 10^{-3} (A / м)$ , а передаточная функция системы будет равна передаточной функции системы

регулирования скорости при введении ПИД регулятора (1). Переходная характеристика системы автоматического управления процессом прессования пирозамедлителя ЭД на гидравлическом прессе при управлении по положению и скорости перемещения пресс-матрицы (при введении ПИД регулятора) представлена на рис. 5.

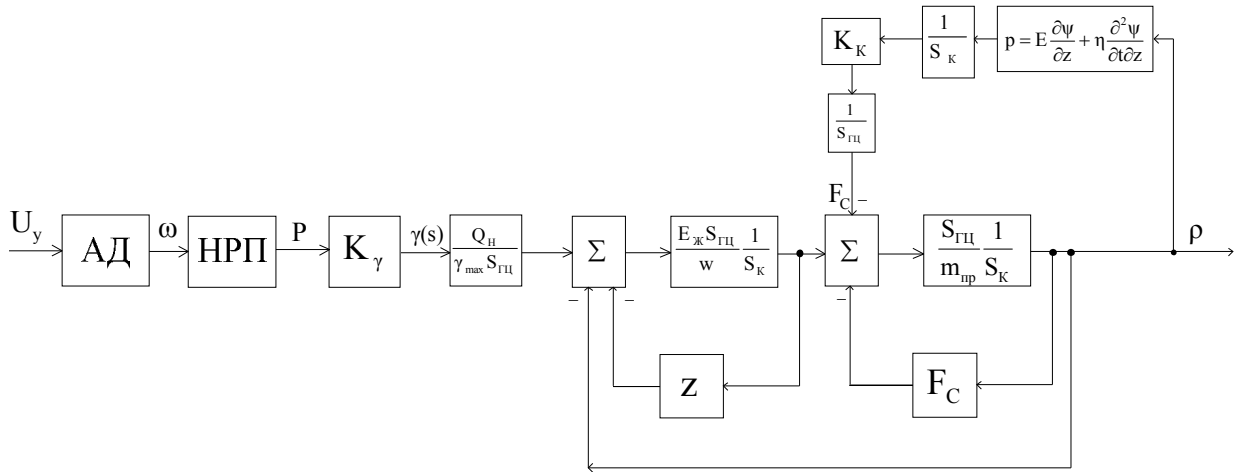


Рис. 1. Структурная схема процесса прессования пирозамедлителя ЭД на гидравлическом прессе как объекте управления:  $U_y$  – управляющее воздействие; АД – асинхронный двигатель;  $\omega$  – угловая скорость вращения АД; ГН – гидравлический насос; P – давление создаваемое ГН; ДР – дроссель регулируемый;  $\Delta P$  – давление на выходе ДР; ГЦ – гидравлический цилиндр;  $F_{ГЦ}$  – усилие прессования; ПИ – прессующий инструмент; z – координата перемещения ПИ; ППМ – прессование ПМ;  $\rho$  – плотность ПМ.

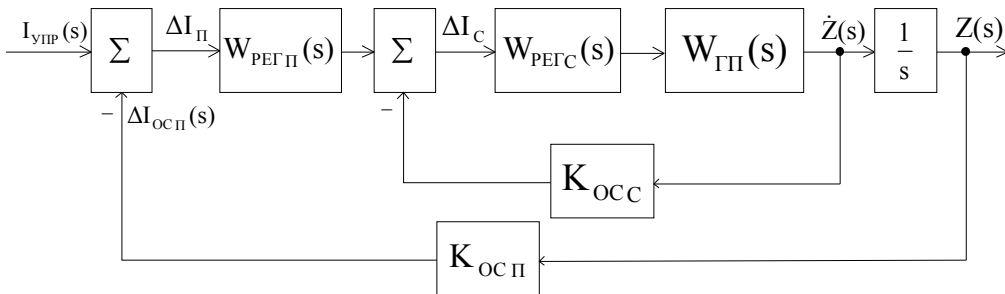


Рис. 2. Структурная схема системы автоматического управления процессом прессования пирозамедлителя ЭД на гидравлическом прессе при управлении по положению и скорости перемещения пуансона

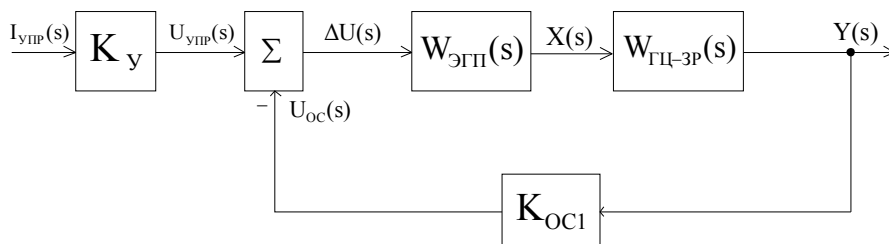


Рис. 3. Структурная схема системы автоматического управления процессом прессования пирозамедлителя ЭД на гидравлическом прессе при управлении по положению прессующей матрицы

$$W_{\Gamma\Pi}(s) = \frac{z(s)}{I(s)} =$$

$$= 0,4918 / (1,528e-24s^9 + 9,99e-19s^8 + 3,511e-14s^7 +$$

$$+ 1,214e-10s^6 + 4,261e-8s^5 + 5,047e-6s^4 +$$

$$+ 0,0002505s^3 + 0,006454s^2 + 0,07743s + 1). \quad (1)$$

После подстановки соответствующих передаточных функций и проведения преобразований произведем синтез внешнего регулятора.

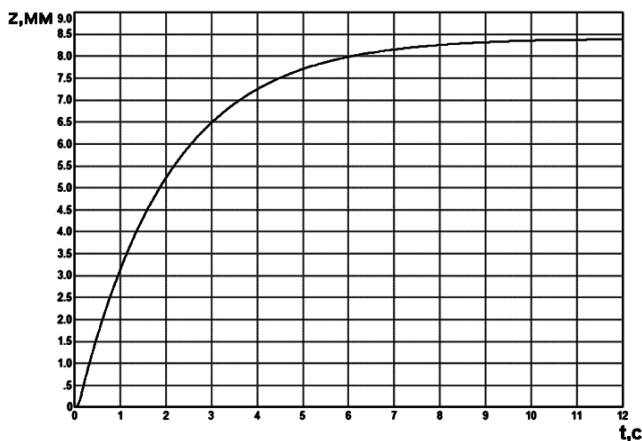


Рис. 4. Переходная характеристика системы автоматического управления процессом прессования пирозамедлителя ЭД на гидравлическом прессе при управлении по положению и скорости перемещения пресс - матрицы (без использования регулятора)

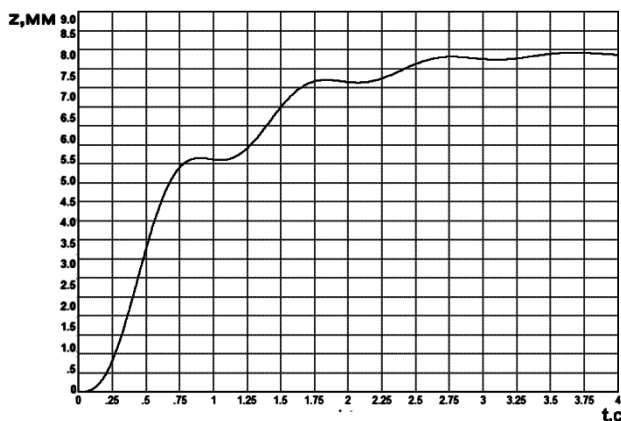


Рис. 5. Переходная характеристика системы автоматического управления процессом прессования пирозамедлителя ЭД на гидравлическом прессе при управлении по положению и скорости перемещения пресс-матрицы (при введении ПИД регулятора)

Для определения параметров коэффициентов регулятора, зададимся следующими показателями качества: вид переходной характеристики - аperiodический, так как данная характеристика обеспечивает плавное изменение положения прессующей матрицы и отсутствие перерегулирования,  $\sigma = 0(\%)$ .

Рассчитав начальные параметры коэффициентов настройки регулятора методом расширенных частотных характеристик и выполнив их проверку с помощью программы Matlab, получим следующие значения искомым коэффициентов  $K_{\Pi} = 28,69$ ,  $T_{И} = 1,083$ ,  $T_{Д} = 7,1939$ .

Подставив передаточные функции  $W_{РЕГ\Pi}(s)$ ,  $W_{РЕГС}(s)$ ,  $W_{\Gamma\Pi}(s)$ ,  $K_{ОСП}$  и  $K_{ОСС}$  в структурную схему (рис. 2), а также произведя необходимые вычисления и преобразования, получим передаточную функцию (2) системы управления процессом прессования пирозамедлителя ЭД на гидравлическом прессе при управлении по положению и скорости перемещения прессующего матрицы.

$$W_{САУ\Pi\Pi}(s) = \frac{Z(s)}{I_{\text{УПР}}(s)} =$$

$$= (461,8s + 9,83) / (7,41e-23s^{11} + 4,846e-17s^{10} +$$

$$+ 1,703e-12s^9 + 2,871e-12s^8 + 1,711e-9s^7 +$$

$$+ 5,416e-6s^6 + 4,156e-4s^5 + + 0,5356s^4 +$$

$$+ 1,642s^3 + 23,84s^2 + 25,14s + 1). \quad (2)$$

Задача управления процессом прессования состоит в нахождении такого управляющего сигнала, который необходимо подать на вход системы управления, при котором прессующий штамп переместится по функции, которая бы обеспечила минимальное, в известном смысле, расхождение между выходной функцией и эталонным процессом.

Реализация полученной передаточной функции (2) системы управления процессом прессования на микропроцессорной технике определяет решение обратной задачи динамики. Решению обратных задач динамики посвящены многие публикации. Особая роль в разработке методик и подходов к решению данного типа задач принадлежит П.Д. Крутько [8].

Для решения обратной задачи динамики необходимо, чтобы система была наблюдаема и управляема [9]. Для оценки наблюдаемости и управляемости системы необходимо представить передаточную функцию в виде матриц, описывающих систему в пространстве состояний, затем задать эталонный (оптимальный) выходной сигнал системы и определить вектор-функцию, характеризующую степень расхождения выходной переменной с эталонным ее значением, соответствующим оптимальному режиму прессования пирозамедлителя ЭД.

После решения описанной задачи методом разложения управляющего воздействия в ряд по ортогональным полиномам (полиномам Лежандра) получим, что для реализации оптимального управления процессом прессования пирозамедлителя ЭД на

гидравлическом прессе при управлении по положению и скорости перемещения прессующей матрицы необходимо, чтобы закон управления прессом имел вид

$$u_{\text{ОПТ}}(t) = 4,0251e-7t^{11} - 7,88e-6t^{10} + 7,6346e-5t^9 - 0,000545372t^8 + 0,002861t^7 - 0,009385t^6 + 0,01759t^5 - 0,020732t^4 + 0,020165t^3 - 0,005329t^2 + 0,07745t + 0,0004129.$$

График изменения оптимального закона управления представлен на рис. 6. На рис. 7 показаны графики эталонного и оптимального законов управления.

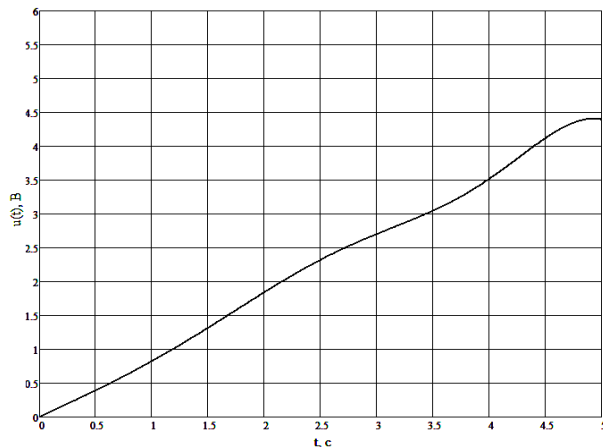


Рис. 6. Закон оптимального управления процессом прессования пирозамедлителя ЭД на гидравлическом прессе при управлении по положению и скорости перемещения пресс-матрицы

Полученные структурная схема (рис.2) и соответствующая ей передаточная функция (2) системы управления процессом прессования пирозамедлителя ЭД на гидравлическом прессе при управлении по положению и скорости перемещения прессующей матрицы, соответствуют аналоговым системам управления. Реализация аналоговыми регуляторами в таком виде проблематична, поэтому для использования полученных законов управления целесообразно их представить в цифровом виде.

Рассмотрим цифровой аналог системы автоматического управления, построенной по принципу управления по положению и скорости перемещения пресс-матрицы (рис.8).

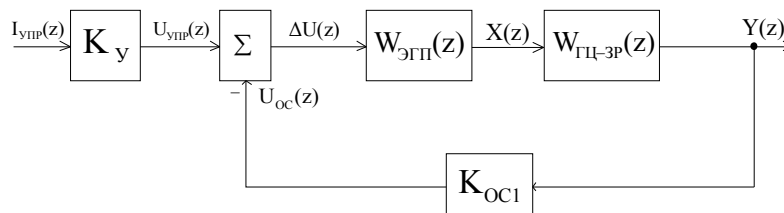


Рис. 8. Структурная схема цифровой системы автоматического управления процессом прессования пирозамедлителя ЭД на гидравлическом прессе при управлении по положению и скорости перемещения пресс-матрицы

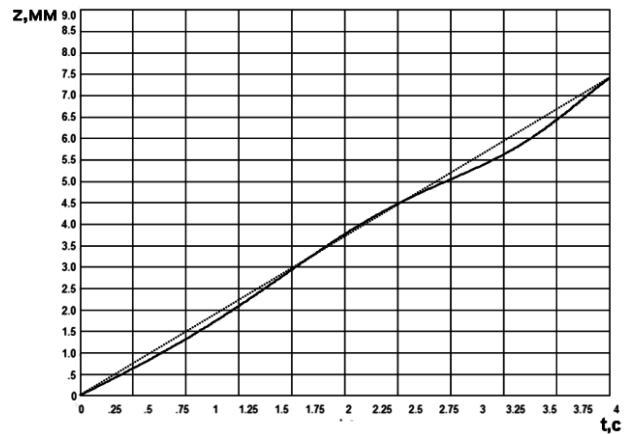


Рис. 7. Графики эталонного и оптимального выходных сигналов при управлении по положению и скорости перемещения пресс-матрицы

Коэффициент обратной связи датчика перемещения

$$K_{\text{OC}} = \frac{I_{\text{OC}}(z)}{Z(z)} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{0,25} = 80 \cdot 10^{-3} \text{ (А / м)}.$$

Коэффициент обратной связи датчика скорости

$$K_{\text{OC}} = \frac{I_{\text{OC}}(z)}{\dot{Z}(z)} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{0,0124} = 1,61 \left( \frac{\text{А}}{\text{м / с}} \right).$$

Передаточные функции  $W_{\text{ГП}}(z)$  и  $W_{\text{РЕГП}}(z)$ ,  $W_{\text{РЕГС}}(z)$  определим путем применения Z преобразования к передаточным функциям  $W_{\text{ГП}}(s)$  и  $W_{\text{РЕГП}}(s)$ ,  $W_{\text{РЕГС}}(s)$ .

$$\begin{aligned} W_{\text{ГП}}(z) &= Z[W_{\text{ГП}}(s)]|_{T_0=0,01} = \\ &= Z[0,4918 / (1,528e-24s^9 + 9,99e-19s^8 + 3,511e-14s^7 + \\ &+ 1,214e-10s^6 + 4,261e-8s^5 + 5,047e-6s^4 + \\ &+ 0,0002505s^3 + 0,006454s^2 + 0,07743s + 1)]|_{T_0=0,01} = \\ &= (3,1826e-6z^8 + 0,00012395z^7 + 0,00042369z^6 + \\ &+ 0,00026233z^5 + 2,9573e-5z^4 + 3,1618e-7z^3 + \\ &+ 7,5589e-14z^2 + 3,9469e-30z + 4,5466e-47) / (z^9 - \\ &- 3,7879z^8 + 5,7568z^7 - 4,4286z^6 + 1,778z^5 - \\ &- 0,33921z^4 + 0,02256z^3 - 2,3106e-17z^2 - \\ &- 1,6297e-33z + 3,3382e-49). \end{aligned} \tag{3}$$

$$W_{\text{РЕГС}}(z) = Z[W_{\text{РЕГС}}(s)] \Big|_{T_0=0,01} = \\ = Z[2,067] \Big|_{T_0=0,01} = 2,067 \cdot$$

$$W_{\text{РЕГП}}(z) = Z[W_{\text{РЕГП}}(s)] \Big|_{T_0=0,01} = \\ = Z\left[64,662 + \frac{069636}{s}\right] \Big|_{T_0=0,01} = \\ = \frac{1,2933z^2 - 1,2932z}{0,02z(z-1)}$$

При проведении  $Z$  преобразования на конечный результат влияет значение периода квантования  $T_0$  с целью определения периода квантования, при котором обеспечивается соответствие между аналоговой и цифровой системой управления, необходимо произвести анализ зависимости отклонения между аналоговой и цифровой системой управления при различных периодах квантования, результат анализа представлен на рис. 9.

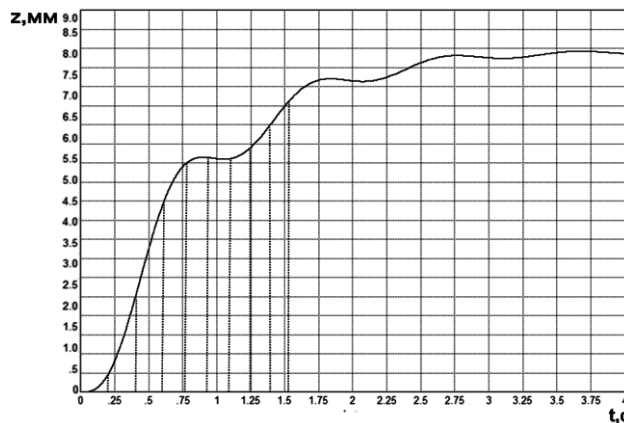


Рис. 9. Анализ переходных процессов системы управления процессом прессования пирозамедлителя ЭД по положению и скорости перемещения пресс-матрицы при различных периодах квантования

Из рис. 9 можно сделать вывод о том, что при управлении процессом прессования пирозамедлителя ЭД по положению и скорости перемещения пресс-матрицы, близким к оптимальному по сформулированному критерию обработки аналогового сигнала, является период квантования  $T_0 \leq 0,0178$ (с).

## Заключение

В работе, на основании разработанной ранее [6] математической модели процесса прессования, была определена передаточная функция процесса прессования пирозамедлителя ЭД. Путем решения обратной задачи динамики, методом разложения управляющего воздействия в ряд по ортогональным по-

линомам, были синтезированы алгоритмы управления гидравлическим прессом управления, обеспечивающие реализацию оптимального режима прессования пирозамедлителя ЭД по заданному критерию. Получены структурная схема и соответствующая ей передаточная функция системы управления процессом прессования пирозамедлителя ЭД на гидравлическом прессе при управлении по положению и скорости перемещения прессующего матрицы в дискретной форме записи, которая позволяет реализовать АПК управления процессом на микропроцессорных средствах.

## Литература

1. Кузнецов, Б.И. Проективання багатоканальних систем оптимального керування [Текст] / Б.И. Кузнецов, Б.В. Новосолов, І.М. Богаєнко. – К.: Техніка, 1993. – 245 с.
2. Многоканальные системы оптимального управления [Текст] / С.Е. Александров, Б.И. Кузнецов, И.Н. Богаенко, Н.А. Рюмишин // Интегрированные АСУ в промышленности. - Киев: НПК „ КИА ”. - 1995. - 313 с.
3. Goh, C.J. On the Nonlinear Optimal Regulator Problem [Text] / C.J. Goh //Automatica. – 1993. – Vol. 29. – P. 751-756.
4. Проектирование многоканальных систем оптимального управления [Текст] /Б.И. Кузнецов, Б.В. Новоселов, И.Н. Богаенко, Н.А. Рюмишин. – Киев: Техника. - 1993. - 248 с.
5. Тихенко, В.Н. Структурная классификация следящих гидроприводов с обратными связями по нагрузке [Текст] / В.Н. Тихенко. //Тр. Одес. политехн. ун-та. - Одесса, 2000. - Вып. 1(10). - С. 35 – 39.
6. Андрусенко, А.А. Модель управления процессом прессования порошковых материалов [Текст]/ А.А. Андрусенко, Г.В. Кулинченко// Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2012. – № 2 (54). – С. 89–94.
7. Андрусенко, А.А. Анализ распределения плотности в колпачке электродетонатор [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. Крутько, П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: нелинейные модели [Текст]/ П.Д. Крутько. – М.: Паука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 328 с.
9. Методы классической и современной теории автоматического управления [Текст]: Учебник в 3-х т. Т.1: Анализ и статистическая динамика систем автоматического управления / Под ред. Н.Д. Егулова. - М.: Изд-во МГТУ им. П.Э. Баумана, 2000. – 748 с.

Поступила в редакцію 19.09.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, професор, зав. каф. комп'ютерних наук А.С. Довбыш, Сумський Государственный университет, Сумы, Украина

### СИНТЕЗ ЗАКОНУ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ПРЕССУВАННЯ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

*О.О. Андрусенко, Г.В. Кулінченко*

В роботі на основі математичної моделі системи управління була визначена передаточна функція процесу пресування піроуповільнювача ЕД. Для реалізації оптимального режиму пресування піроуповільнювача ЕД відповідно до заданого критерію методом розкладання керуючого впливу в ряд по ортогональних поліномів вирішується зворотна задача динаміки і синтезуються алгоритми керування гідравлічним пресом. Отримані структурна схема та відповідна їй передаточна функція системи управління процесом пресування піроуповільнювача ЕД на гідравлічному пресі при управлінні по положенню і швидкості переміщення пуансону гідравлічного пресу в дискретній формі запису.

**Ключові слова:** синтез, закон управління, пресування, передаточна функція, алгоритм.

### SYNTHESIS OF OPTIMAL CONTROL LAW PROCESS PRESS POWDER MATERIALS

*A.A. Andrusenko, G.V. Kulichenko*

In paper the control system was determined by the transfer function of the compaction material pyrotechnic inhibitor ED based on a mathematical model. For realization optimal compression pyrotechnic inhibitor ED on specific criteria by decomposition of the control action in a series of orthogonal polynomials solve the inverse problem of dynamics and control algorithms are synthesized by a hydraulic press. Obtained block diagram and the corresponding transfer function of the process control system pressing pyrotechnic inhibitor ED on a hydraulic press to manage the position and speed of movement of the pressing of the matrix in the discrete notation.

**Keywords:** synthesis, control law, presswork, transfer function, algorithm.

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

**Кулинченко Георгий Васильевич** - канд. техн. наук, доцент кафедры системотехники и информационных технологий, Сумской Государственный университет, Сумы, Украина