

УПРАВЛЕНИЕ ПРИВОДОМ СИСТЕМЫ ДОЗИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ ОТЛИВА ПЛЕНОК

Аналізуються параметри об'єкту, які забезпечують рівномірність спливу полімерної композиції з філь'єри на підкладку. Розглянуто підхід до розбудови регулятора приводу системи дозування, яка має в своєму складі ланку запізнювання. В результаті моделювання мехатронного модуля дозування отримані оптимальні налаштування регулятора, які забезпечують необхідну якість регулювання по сформованому критерію.

Анализируются параметры объекта, обеспечивающие равномерность истечения полимерной композиции из фильеры на подложку. Рассмотрен подход к построению регулятора привода системы дозирования, содержащей звено запаздывания. В результате моделирования мехатронного модуля дозирования получены оптимальные настройки регулятора, обеспечивающего необходимое качество регулирования по сформированному критерию.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение заданных условий истечения полимерной композиции из формирующей фильеры при отливе полимерных пленок реализуется посредством управления электромеханическими параметрами электропривода системы дозирования. Специфичность электромеханических параметров электропривода процесса дозирования проявляется в том, что эти параметры зависят от физико-механических характеристик дозируемой полимерной композиции. Нестационарный характер возмущений технологических факторов процесса осложняет управление процессом дозирования в целом. Сложности настройки приводят к функциональным ограничениям процесса дозирования, обусловленными уменьшением возможностей стабильной работы дозатора в требуемом диапазоне параметров дозирования. При построении регуляторов дозирования вязких жидкостей на основе традиционных схем, особенно при малых расходах дозируемой композиции трудно получить приемлемую точность дозирования.

Основой для автоматизации привода дозирования могут служить достижения современной теории управления и широкие возможности новых микроэлектронных средств, обеспечивающие требуемые технологические показатели за счет применения оптимальных, адаптивных управляющих устройств, регуляторов переменной структуры и т.п.

Исходя из задачи увеличения функциональных возможностей дозирующей системы, повышения устойчивости и точности дозирования, представляется целесообразным построение такой системы электропривода дозирования, которая позволит подстраивать параметры регулятора в соответствии с изменяющимися условиями протекания потока дозируемой композиции.

Сложность функционирования системы дозирования [1] заключается в необходимости одновременной оценки точности дозирования композиции и степени компенсации действующих возмущений, при этом основным регулируемым параметром электропривода является вращающий момент шагового двигателя (ШД) с нелинейным характером нагрузки.

Поэтому классические подходы к разработке регулятора дозирования, основанные на линеаризации характеристик объекта управления, малоперспективны ввиду сложности получения приемлемой точности в требуемом диапазоне регулирования.

В то же время использование адаптивных регуляторов ставит вопросы практической реализации алгорит-

мов управления электроприводом на микропроцессорных средствах, поскольку с возрастанием сложности управляющих программ повышается вероятность появления погрешностей и ошибок регулирования.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ОПИСАНИЯ СИСТЕМЫ ДОЗИРОВАНИЯ

Основной целью работы является синтез регулятора системы дозирования полимерной композиции, обеспечивающий равномерность истечения раствора полимера из фильеры на подложку в условиях действия нелинейных нагрузок и возмущений. Этот синтез базируется на оценках адекватности модели мехатронного модуля дозирования (ММД).

Структурная схема ММД композиции при отливе пленок представлена на рис. 1.

Схема ММД состоит из функциональных блоков: шагового двигателя (ШД); шестеренного насоса (НШ); трубопровода; фильеры (Ф). Входной величиной ММД является частота управляющих импульсов f_i , а выходной величиной – расход полимерной композиции Q на выходе фильеры.

Каждый из блоков модели может быть представлен своей операторной передаточной функцией.

Результирующий момент M_{Σ} , который вращает нагрузку с моментом инерции J , учитывает воздействие момента нагрузки M_c , преодолеваемого в результате вращения НШ, и момента сухого трения M_f . Величина вязкого трения M_v пропорциональна коэффициенту D зависит от скорости вращения ω ШД.

Функционирование ММД можно описать системой операторных уравнений, связывающих вход/ выход системы.

Электрический угол смещения ротора ШД φ зависит от частоты управляющих импульсов f_i :

$$\varphi(s) = k_1 \cdot f_i / s, \quad (1)$$

где s – оператор Лапласа

Механический угол смещения ротора ШД θ определяется скоростью вращения ШД ω :

$$\Theta(s) = k_2 \cdot \omega / s. \quad (2)$$

Вращающий момент ШД M_d формируется разностью этих углов:

$$M_d = M_0 \sin(\varphi - \Theta), \quad (3)$$

где M_0 – критический момент ШД.

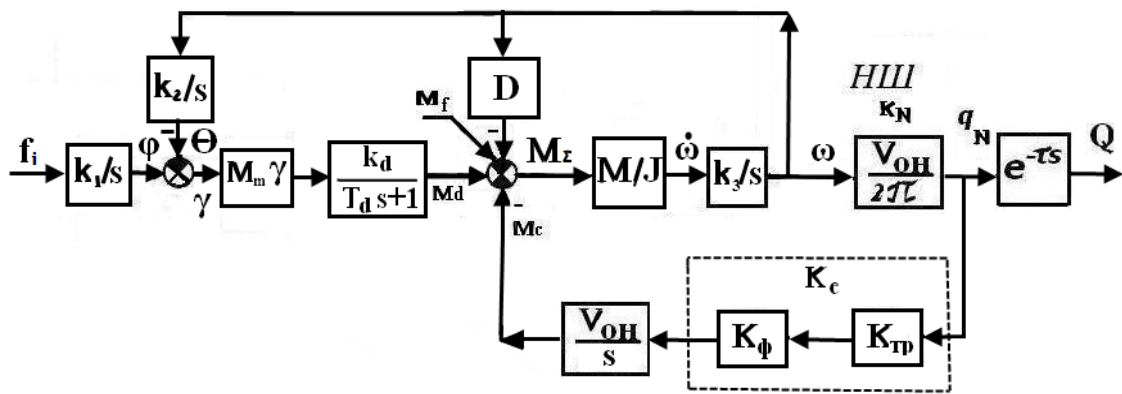


Рис. 1. Структурная схема моделирования ММД

Учитывая, что значение разностного угла имеет малую величину, с достаточной степенью точности можно записать:

$$M_D = M_0 \sin(\varphi - \Theta) \approx M_0(\varphi - \Theta). \quad (3')$$

В уравнения движения ротора КД входят электромеханические параметры ШД [2], которые позволяют изучать и прогнозировать динамические характеристики приводов применяющих упомянутые ШД, в то же время вопросы влияния нелинейных нагрузок на эти характеристики остается открытым.

Если пренебречь насыщением магнитной цепи и потерями сердечнике, то при определенном положении ШД можно представить модель двигателя постоянного тока. Поэтому во многих практических случаях, когда электромеханическая постоянная времени объекта существенно превышает электромагнитную постоянную времени ШД, исследования влияния электромагнитных явлений не является главными.

Рассматривая значение момента ШД в различных режимах его работы, обычно предполагают, что время достижения токами обмоток постоянных значений много меньше, чем время отработки шага ШД, поэтому в пределах шага тока можно считать постоянными. Однако при высоких частотах коммутации токи в обмотках могут не достигать устойчивых значений, вследствие чего электромагнитный момент \$M_d\$ КД уменьшается. Поэтому для учета влияния переходных электромагнитных процессов коммутации токов на динамику модуля в состав структурной схемы моделирования (рис. 1) включено инерционное звено с постоянной времени ШД \$T_d\$. Эта постоянная зависит от индуктивности \$L_d\$ и сопротивления обмотки \$R_d\$ фазы ШД и отражает скорость достижения током обмотки ШД своего установившегося значения.

В случае возникновения вопроса об ограничении динамики ШД, а также в случаях применения сложных законов управления, математическая ММД должна отражать влияние электромагнитных процессов на функционирование ШД.

Работоспособность электромеханических систем при различных частотах управляющих импульсов, ШД выбираются с моментом, превышающим момент нагрузки \$M_c\$ во всех режимах работы системы.

Результирующий момент \$M_\Sigma\$, который превышает момент сопротивления и вращает НШ:

$$M_\Sigma = M_m(\varphi - \Theta_p) - \omega D - M_C - M_f, \quad (4)$$

где \$M_C = P_C \cdot V_0\$ – момент сопротивления (нагрузки), \$P_C\$ – давление дозируемой композиции в системе, \$V_0\$ – рабочий объем насоса.

В свою очередь давление в системе определяется интегралом от расхода полимерной композиции на выходе НШ ММД \$q_N\$ с учетом коэффициента потерь давления при течении композиции в трубопроводе и фильтре.

$$P_C = \frac{K_C \cdot q_N}{s},$$

где \$K_C\$ – коэффициент передачи тракта дозирования, определяемый его гидравлическим сопротивлением.

Учитывая влияние нелинейной нагрузки на вращающий момент ШД, запишем его скорость вращения \$\omega\$:

$$\omega(s) = \frac{k_1 M_m f_i - k_2 M_m \omega - D \cdot \omega \cdot s - \omega \cdot K_C \cdot V_n^2 / 2\pi - M_f \cdot s}{J \cdot s^2}. \quad (5)$$

Присутствие в выражении (5) значения сухого трения \$M_f\$ значительно усложняет получение аналитического представления передаточной функции (частота вращения \$\omega\$)/(частота управляющих импульсов \$f_i\$). В то же время экспериментальная оценка значения этого момента \$M_f\$, которое составляет 1 % от \$M_\Sigma\$, позволяет упростить уравнение (5) и получить упомянутую операторную передаточную функцию в виде:

$$W_1(s) = \frac{k_1 M_m}{J s^2 + D s + k_2 M_m + V_n^2 K_C / 2\pi}. \quad (6)$$

Или в общем виде:

$$W_1(s) = \frac{k_{M1}}{T_2 s^2 + T_1 s + 1}, \quad (7)$$

где \$k_{M1} = \frac{k_1 \cdot M_m}{k_2 \cdot M_m + V_n^2 \cdot K_C / 2\pi}\$ – коэффициент пере-

дачи звена модели МД; \$T_1 = \frac{D}{k_2 \cdot M_m + K_C \cdot V_n^2 / 2\pi}\$ –

"механическая" постоянная времени МД,

\$T_2 = \frac{J}{k_2 \cdot M_m + K_C \cdot V_n^2 / 2\pi}\$ – общая постоянная време-

ни МД.

Учитывая возможности исследования влияния электромагнитных процессов функционирования ШД на процессы дозирования в МД, включим в операторную функцию (8) апериодическое звено с постоянной времени \$T_d\$:

$$W_1(s) = \frac{k_{M1}}{(T_2s^2 + T_1s + 1) \cdot (T_Ds + 1)}, \quad (8)$$

где T_D – постоянная времени ШД.

Спецификой исследуемой модели ММД является наличие звена транспортного запаздывания, которое отражает процесс перемещения композиции по трубопроводу, соединяющему НШ с фильерой. Математическое описание процесса базируется на уравнениях "длинных линий" в частных производных. В результате решения этих уравнений при заданных начальных условиях получают соотношение вида[3]:

$$W(s) = K_{TP}(s) \exp(-\tau \cdot s), \quad (9)$$

где $K_{TP}(s) = \frac{8\mu L_{TP}}{\pi r^4}$ – гидравлические потери давления в трубопроводе, находится из уравнения потерь давления при ламинарном течении жидкости [4]

$$s \cdot P_c = \frac{8\mu L_{TP} \cdot q_n}{\pi r^4}.$$

Величина времени транспортного запаздывания τ также зависит от длины L_{TP} и радиуса трубопровода r , вязкости композиции μ и перепада давления ΔP на его концах:

$$\tau = \frac{1}{c} \cdot \frac{L_{TP}^2}{\Delta P} = \frac{8\mu}{r^2} \cdot \frac{L_{TP}^2}{\Delta P}. \quad (10)$$

Значение вязкости дозируемой композиции μ играет определяющую роль в оценке времени запаздывания и стабильности дозирующей системы в целом.

Гидравлическое сопротивление фильеры так же, как и трубопровод, создает дополнительную нагрузку насосу, при этом перепад давления в фильере при ламинарном течении оценивается[4]:

$$\Delta P_\phi = \frac{12\mu L_f q_N}{bh^3}, \quad (11)$$

где h , b , L_f – высота, ширина, длина щели фильеры, или в операторной форме:

$$sP_C = \frac{12\mu L_f q_N}{bh^3}. \quad (11')$$

Коэффициент передачи фильеры K_ϕ имеет вид:

$$K_\phi = \frac{12\mu L_f}{bh^3}.$$

Таким образом, коэффициент передачи тракта дозирования K_C , определяющий постоянные времени МД:

$$K_C = K_{TP} + K_\phi.$$

Принимая во внимание временную задержку τ при дозировании композиции, передаточная функция (8) преобразуется к виду:

$$W_1(s) = \frac{k_{M1} \cdot \exp(-\tau \cdot s)}{(T_2s^2 + T_1s + 1) \cdot (T_Ds + 1)}. \quad (12)$$

В уравнениях (5), (6), коэффициенты k_1 , k_2 являются константами интегрирования.

Поскольку выходным параметром МД является расход композиции Q , то для получения общей передаточной функции МД выражение (12) дополнится множителем, выражающим коэффициент передачи НШ k_n :

$$k_n = \frac{V_n}{2\pi}.$$

Соответственно общая операторная передаточная функция ММД представляется:

$$W_1(s) = \frac{k_{M1} \cdot k_n \cdot \exp(-\tau \cdot s)}{(T_2s^2 + T_1s + 1) \cdot (T_Ds + 1)}. \quad (13)$$

Переходные характеристики ММД можно рассчитать в результате подстановки паспортных данных НШ-1,2 и ШД типа FL57ST41 в соответствующие выражения:

$$K_{M1} = 0,03; K_N = 1,9 \cdot 10^{-7}; \\ T_1 = 6,9 \cdot 10^{-3}; T_2 = 3,3 \cdot 10^3; T_D = 1 \cdot 10^{-3}.$$

Переходные характеристики ММД, полученные в результате преобразования Лапласа над уравнением (13), представлены на рис. 2.

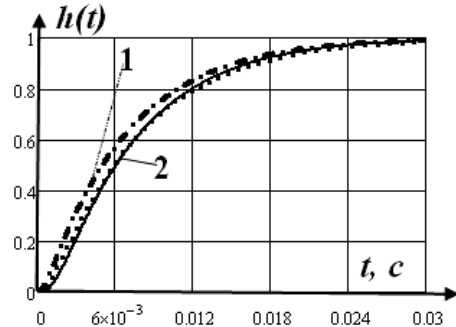


Рис. 2. Переходные характеристики ММД (1) $T_D = 0$, (2) – с учетом постоянной времени ШД

Анализ характеристик показывает, что в силу различия характеристик кривых 1 и 2 (рис. 2), параметры используемых в системе дозирования устройств не позволяют пренебречь постоянной времени ШД. В то же время оценка погрешности моделирования МД аперийским звеном (пунктирная линия $T_2 = 0$ на рис. 2) показывает допустимость такой аппроксимации.

Для получения переходной характеристики ММД, учитывающей транспортную задержку, в среде MatLab использовалась схема, приведенная на рис.3.

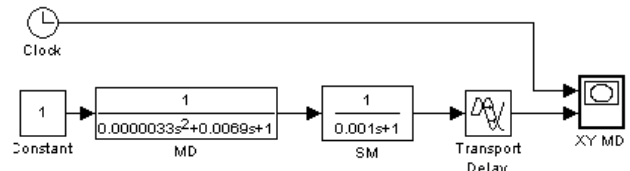


Рис. 3. Схема получения переходной характеристики ММД

Модельные переходные характеристики, отражающие переходной процесс ММД (рис. 4), сравнивались с осциллограммами разгонных характеристик, полученными на установке дозирования экспериментально (рис. 5).

Результаты эксперимента подтверждают адекватность полученной модели МД.

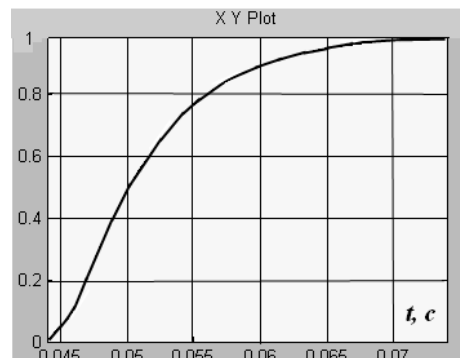


Рис. 4. Переходная характеристика ММД

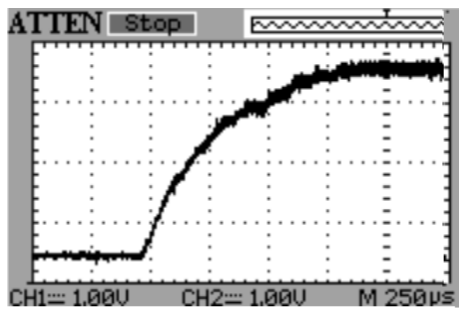


Рис. 5. Осциллограмма переходного процесса ММД

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ДОЗИРОВАНИЯ

Основным фактором, определяющим процесс синтеза регулятора, является выбор критерия оценки качества регулирования требуемых параметров.

Исходя из задач управления процессом отлива пленок, к регулятору предъявляются требования обеспечения устойчивости и точности дозирования композиции. В силу действия возмущений разного характера для их минимизации от регулятора требуется минимальное время переходного процесса регулирования расхода. При этом требования к перерегулированию остаются достаточно жесткими, не более 5 %.

Анализ модели ММД дает основание классифицировать исследуемый модуль как объект с запаздыванием [5] и использовать для синтеза оптимального по быстродействию регулятора соответствующие подходы.

Оценим эффективность использования ПИ-регулятора в исследуемой системе дозирования с помощью схемы, изображенной на рис. 6.

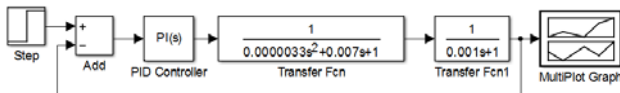


Рис. 6. Схема моделирования ПИ регулятора ММД

В результате подстройки параметров ПИ-регулятора удается получить перерегулирование не более 10 %, что не дает возможности гарантировать устойчивость ММД (рис. 7).

Применение этих же настроек в ММД с запаздыванием (рис. 8) приводит к разбалансировке объекта регулирования (рис. 9).

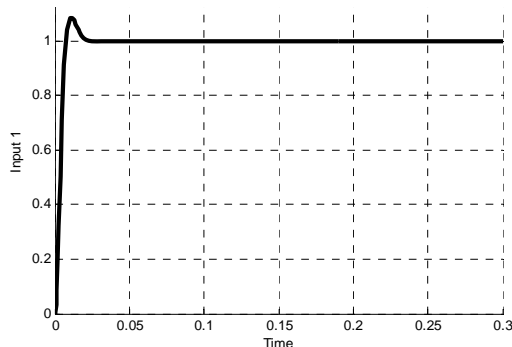


Рис. 7. Переходная характеристика ММД с настроенным ПИ-регулятором

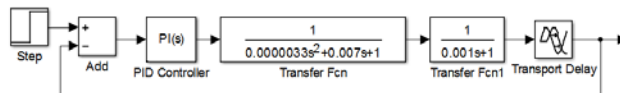


Рис. 8. Схема моделирования ПИ регулятора ММД с учетом транспортной задержки

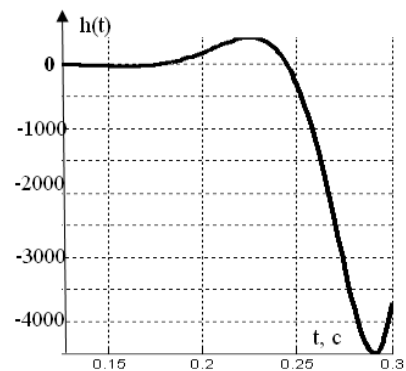


Рис. 9. Переходная характеристика ММД с учетом транспортной задержки

Оценивая устойчивость используемого регулятора в составе ММД по критерию Михайлова, можно констатировать, что наличие звена запаздывания значительно уменьшает устойчивость регулятора. Поэтому для повышения устойчивости приходится уменьшать коэффициент усиления используемого регулятора, что не позволяет эффективно компенсировать возмущения параметров объекта.

Чтобы определиться с методикой структурно-параметрического синтеза регулятора объекта с запаздыванием, оценивают соотношение наибольшей постоянной времени объекта и времени запаздывания.

В нашем случае запаздывание превышает основную постоянную времени объекта T_1 , поэтому ориентировочно выбираем постоянную времени ПИ-регулятора T_H по соотношению:

$$T_H = \frac{T_1 + \tau}{2,5} = 0,02 \text{ c} .$$

Настроив ПИ-регулятор с учетом транспортной задержки в ММД, получаем $T_H = 0,0096 \text{ c}$, а коэффициент усиления $K_U = 0$, что не дает возможности эффективно компенсировать возмущения процесса дозирования (рис. 10). Отработка заданного значения с минимальным перерегулированием достигается за счет увеличения времени регулирования.

Более эффективные регуляторы объектов с запаздыванием реализуются на основе регуляторов, которые содержат блоки, предсказывающие реакцию объекта через время задержки τ , называемыми предикторами Смита [6].

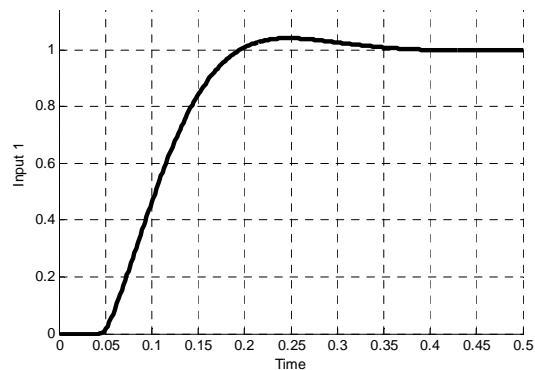


Рис. 10. Переходная характеристика настроенного ПИ-регулятора с учетом транспортной задержки

Такой регулятор, кроме главного, имеет дополнительный контур обратной связи в виде блока, содер-

жащем модель объекта с запаздыванием и модель объекта без запаздывания. В дополнительном контуре обратной связи и формируется сигнал, идентичный сигналу, который со временем появится на выходе системы. Сигнал дополнительного контура действует таким образом, чтобы компенсировать разницу выходного сигнала объекта управления и модельного блока.

На рис. 11 представлена схема регулятора с предиктором Смита в составе ММД, реализованная в среде MatLab.

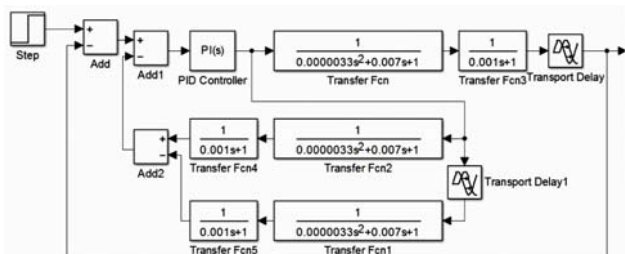


Рис. 11. Схема моделирования ПИ-регулятора ММД

Передаточная функция системы, содержащей предиктор Смита, описывается следующим соотношением:

$$W_S(s) = \frac{W_o(s)W_p(s)}{1 + W_p(s)W_M(s) + W_p(s)[W_o(s) - W_M(s)] \cdot \exp(-\tau s)}, \exp(-\tau s),$$

где $W_o(s)$, $W_M(s)$, $W_p(s)$ – передаточные функции объекта, модели и ПИ-регулятора соответственно.

Из последнего соотношения видно, что качество регулятора с предиктором Смита улучшается по мере приближения $W_M(s)$ к $W_o(s)$ реального объекта. В идеальном случае, когда они совпадают, транспортная задержка может быть скомпенсирована.

Переходная характеристика этого случая реализованного в результате настройки регулятора средствами MatLab, изображена на рис. 12.

Из сравнения переходных характеристик (рис. 10 и рис. 12) видно, что применение предиктора Смита в рассматриваемой системе дозирования позволяет значительно уменьшить время регулирования.

Касаясь вопросов практической реализации регулятора с предиктором Смита, следует констатировать, что основным препятствием является возможность получения точной модели управляемого объекта. Дополнительные трудности в настройке таких регуляторов проявляются при флуктуациях времени задержки в системе.

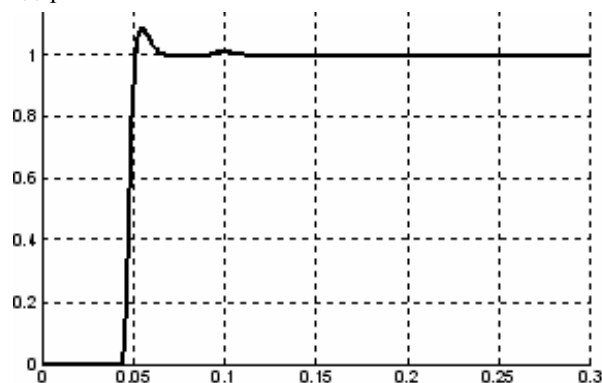


Рис. 12. Переходная характеристика настроенного ПИ-регулятора в составе ММД

Развитием принципов управления, обеспечивающих отсутствие запаздывания в характеристиче-

ском уравнении замкнутой системы, является построение робастных систем с запаздыванием [7]. Такие системы позволяют получить решение, которое обладает значительной грубостью к параметрической неопределенности модели объекта и тем самым обеспечить требуемый диапазон устойчивости.

ВЫВОД

Исходя из требований обеспечения устойчивости и минимального времени регулирования, выработан подход к реализации регулятора системы дозирования полимерной композиции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багута В.А., Кулинченко Г.В. Оценка характеристик мехатронного модуля на базе шагового двигателя // Вісник НТУ "ХП". – 2013. – №51(1024). – С. 43-53.
2. Morar A. Stepper Motor Model for Dynamic Simulation. *IEEE Trans. Automatic Control*, 2003, Vol.44, №2, pp. 117-122.
3. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. – М.: Наука, 1989. – 304 с.
4. Башта Т.М. Гидропривод и гидропневмоавтоматика. – М.: Машиностроение, 1972. – 320 с.
5. Лукас В.А. Теория управления техническими системами. – Екатеринбург: УГГА, 2002. – 675 с.
6. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием: Пер. с польского. – М.: Машиностроение, 1974. – 328 с.
7. Ремизова О.А., Рудакова И.В., Сыроквашин В.В., Фокин А.Л. Робастное управление линейным объектом с запаздыванием с применением квадратичных методов синтеза системы // Изв. ВУЗов. Приборостроение. – 2011. – Т.54. – №12. – С. 22-29.

REFERENCES: 1. Baguta V.A., Kulichenko G.V. Ocenka karakteristik mehatronnogo modula na baze shagovogo dvigatelja. *Bulletin of NTU "KhPI"*, 2013, no.51(1024), pp. 43-53. 2. Morar A. Stepper Motor Model for Dynamic Simulation. *IEEE Trans. Automatic Control*, 2003, Vol.44, no.2, pp. 117-122. 3. Popov E.P. *Teoriya linejnyh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya i upravleniya*. Moscow, Nauka Publ., 1989. 304 p. 4. Bashta T.M. *Gidroprivod i gidropnevmoavtomatika*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 320 p. 5. Lukas V.A. *Teoriya upravleniya tehniceskimi sistemami*. Ekaterinburg, UGGA Publ., 2002. 675 p. 6. Gureckij H. *Analiz i sintez sistem upravleniya s zapazdyvaniem: Per. s pol'skogo*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 328 p. 7. Remizova O.A., Rudakova I.V., Syrovkashin V.V., Fokin A.L. Robastnoe upravlenie linejnym ob'ektom s zapazdyvaniem s primeneniem kvadratichnyh metodov sinteza sistemy. *Izv. VUZov. Priborostroenie*, 2011, Vol.54, no.12, pp. 22-29.

Поступила (received) 16.01.2014

Кулинченко Георгий Васильевич¹, к.т.н., доц.,
Багута Виктор Анатольевич¹, аспирант,
¹ Сумский государственный университет,
40007, Сумы, ул. Римского-Корсакова, 2,
тел/phones +38 095 8000123, +38 050 2747052,
e-mail: heorhy@rambler.ru, viktrbaguta@gmail.com

G.V. Kulichenko¹, V.A. Baguta¹

¹ Sumy State University
2, Rymyskogo-Korsakova Str., Sumy, 40007, Ukraine

Cast-film polymer composition dosing system drive control.

Object parameters providing uniformity of polymer composition outflow from the spinneret to the substrate are analyzed. An approach to drive controller construction for a dosing system comprising a lag element is considered. Mechatronic dosing module simulation has resulted in optimal controller settings providing required control quality according to a specified criterion.

Key words – polymer composition, drive control, controller, mechatronic module.