

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ КОНТУРОМ СТАБИЛИЗАЦИИ КАЧЕСТВА

Предлагается методика совершенствования системы управления FDM-процессом, позволяющая повысить качественные показатели процесса и выбрать лучший вариант структуры системы управления по критерию устойчивости.

В настоящее время управление технологическими процессами, основанными на принципах производства деталей путем наращивания припуска, осуществляется путем прямого числового программного управления [1], что не позволяет им конкурировать с традиционными технологиями производства с удалением припуска по выходным показателям качества изделий. Основной целью данной работы является повышение качественных показателей технологического процесса. Задача решается путем совершенствования структуры системы управления. В систему управления введен дополнительный контур позволяющий за счет регулирования параметров процесса стабилизировать его выходные показатели. В связи с чем, необходимо рассмотреть задачу устойчивости модернизированной системы управления, обеспечивающей лучшие качественные показатели.

Рассматриваемый FDM-процесс (Fused Deposition Modeling), как объект управления, заключается в следующем. Расплавленный формообразующий материал через сопло подается на подвижную платформу с изделием, которая может перемещаться по координате Z, а по двум другим координатам X и Y перемещается сама формообразующая головка. Материал послойно затвердевает, образуя изделие. Если не контролировать процесс остывания материала, то вследствие отклонений его свойств и условий формообразования, изделие под действием возникающих температурных напряжений деформируется, что ведет к искажению формы изделия. С целью стабилизации процесса по показателям качества в систему управления был введен дополнительный контур регулирования выходной величины. Схема модернизированной системы управления изображена на рисунке 1.

Новыми элементами системы управления, позволяющими контролировать выходную величину и регулировать процесс являются: датчик обратной связи D_T , блоки Φ_1 , Φ_2 , U_Z , УПБ (усилительно-преобразовательный блок), блок сравнения 1 сумматор 2. В качестве датчика обратной связи был взят дистанционный термометр (пирометр), контролирующий температуру поверхности затвердевающего слоя, так как контролировать контактными методами размеры образующегося слоя не представляется возможным ввиду того, что процесс формообразования основан на фазовом переходе материала изделия из расплава в твердое состояние. Это обстоятельство является причиной того, что был принят косвенный метод контроля отклонений регулируемой величины.

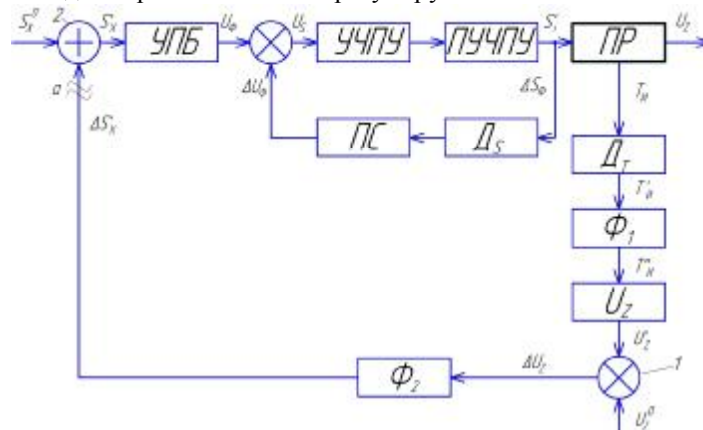


Рисунок 1 – Функциональная схема системы регулирования FDM-процессом с дополнительным контуром регулирования

От датчика D_T сигнал поступает в блок Φ_1 , в котором вычисляются параметры температурного поля, соответствующие T'_H . Перемещение U_Z , соответствующее восстановленному температурному полю, вычисляется в блоке U_Z . Затем полученное значение U'_Z сравнивается с допустимым значением U_Z^0 в сравнивающем устройстве 1 и величина рассогласования ΔU_Z поступает в блок Φ_2 , где вычисляется соответствующее ΔU_Z значение коррекции подачи $\Delta S'_x$. С учетом знака $\Delta S'_x$ суммируется в устройстве 2 с ΔS_x^0 и скорректированная величина S'_x поступает через УПБ в систему ЧПУ, здесь привод ЧПУ обрабатывает скорректированный сигнал. Таким образом, корректируя входное значение S_x^0 , система управления поддерживает значение выходной величины U_Z в заданных пределах.

Для исследования динамических характеристик разработанной системы управления были построены математическая модель и передаточная функция системы.

Процесс (ПР), являющийся объектом управления представлен системой дифференциальных уравнений содержащих операторы нестационарной теплопроводности и термоупругости. Для каждого уравнения сформулированы граничные и начальные условия. Математическая модель объекта управления имеет вид

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T_i) = c \frac{\partial T_i}{\partial t}, \quad (1)$$

где λ , c – коэффициенты теплопроводности и теплоемкости материала изделия, t – время, T_i – температура в i -м объеме затвердевающего слоя;

$$-\lambda \frac{\partial T_i(x_n, t)}{\partial n} = \alpha_j [T(x_n, t) - \theta], \quad (2)$$

$$T_i(x_n, t) = T'_{nl} \Big|_{x=l/2}, \quad T_i(x_n, t) = T_0 \Big|_{z=-h/2}, \quad T_i(x_n, t) = T'_{nl} \Big|_{t=0},$$

где α_j – коэффициент теплоотдачи на j -ой поверхности, θ – температура окружающей среды, h , l – размеры элементарного объема;

$$\nabla^2 \nabla^2 \varphi = 0, \quad \nabla^2 F = \frac{2GK}{\lambda' + 2G} \alpha_T T_i, \quad (3)$$

где G , $K = 2G + 3\lambda_y$, λ' – свойства материала изделия, α_T – коэффициент линейного расширения материала;

$$\sigma_x = 0 \Big|_{x=-l/2}, \quad \sigma_z = 0 \Big|_{z=-h/2}. \quad (4)$$

Решение комплекса краевых задач (1) – (4) было получено в аналитическом виде, что позволило связать регулируемую величину U_z , характеризующую температурную деформацию образующегося слоя с температурой и временем. Это решение имеет вид:

$$U_z = \frac{1}{E} \int \left(\frac{\partial^2 (\varphi - F)}{\partial X^2} - \nu \frac{\partial^2 (\varphi - F)}{\partial Z^2} \right) dz$$

здесь $\varphi(x, z)$ – бигармоническая функция, удовлетворяющая уравнению (2), $F(x, z, t)$ – функция удовлетворяющая уравнению (3), в правой части которого стоит функция $T(t)$, полученная из уравнения (1). Все постоянные интегрирования для функций $\varphi(x, z)$ и $F(x, z, t)$ определены из граничных и начальных условий.

В качестве задающего воздействия принята величина перемещения формообразующего сопла S_x , которая с U_z связана следующим образом

$$U_z = \Phi(x) \cdot e^{-ak^2 l / S_x},$$

где α – коэффициент температуропроводности, k – постоянная разделения переменных.

Передаточная функция для объекта управления ПР была получена с помощью преобразования Карсона-Хевисайда функции $U_z(x, t)$ [2]

$$W(p) = \Phi(x) \frac{k_0 \cdot p}{1 + T_0 \cdot p} \cdot e^{-\tau \cdot p},$$

где $T_0 = \frac{1}{ak^2}$, $ak^2 = k_0$.

Передаточные функции электронных блоков рассматривались как безинерционные звенья, так как их быстродействие на 2 – 3 порядка выше, чем у блока ПР. В результате получена передаточная функция разомкнутой системы

$$W(x, p) = \frac{k_{\Sigma_i} \cdot \Phi(x) \cdot p}{(1 + T_0 \cdot p) \cdot e^{\tau \cdot p}},$$

где $k_{\Sigma_i} = \prod_{j=1}^N k_j$, k_j – коэффициенты передачи безинерционных звеньев, а также передачная функция замкнутой системы в виде:

$$\Phi(p) = \frac{p \cdot K'_i}{p \cdot K'_i + (1 + T_0 \cdot p) \cdot e^{\tau \cdot p}}.$$

Для анализа устойчивости разработанной системы управления были получены частотные передачные функции разомкнутой системы (дискретность по x задавалась $\Delta x = 0,1$ мм)

$$W_1(j\omega) = \frac{K_i \omega (\sin \omega \tau + T_0 \omega \cos \omega \tau)}{(\cos \omega \tau - T_0 \omega \sin \omega \tau)^2 + (\sin \omega \tau + T_0 \omega \cos \omega \tau)^2} + \\ + j \frac{K_i \omega (\cos \omega \tau - T_0 \omega \sin \omega \tau)}{(\cos \omega \tau - T_0 \omega \sin \omega \tau)^2 + (\sin \omega \tau + T_0 \omega \cos \omega \tau)^2} \quad (5)$$

и замкнутой системы

$$\Phi(j\omega) = \frac{\omega \cdot K'_i (\sin \omega\tau + T_0 \omega \cos \omega\tau + \omega K'_i)}{(\cos \omega\tau - T_0 \omega \sin \omega\tau)^2 + (\sin \omega\tau + T_0 \omega \cos \omega\tau + \omega K'_i)^2} + \\ + j \frac{\omega K'_i (\cos \omega\tau - T_0 \omega \sin \omega\tau)}{(\cos \omega\tau - T_0 \omega \sin \omega\tau)^2 + (\sin \omega\tau + T_0 \omega \cos \omega\tau + \omega K'_i)^2} \quad (6)$$

Для наилучшего варианта комплекта технических средств модернизированной системы управления амплитудно-фазовые характеристики, построенные с помощью (5) и (6), показаны на рисунке 2.

В соответствии с критерием Найквиста разомкнутая и замкнутая системы устойчивы.

Таким образом, введение в существующую систему числового программного управления FDM-процессом дополнительного контура обратной связи с косвенным измерением выходной величины позволяет стабилизировать процесс, при этом синтезированный регулятор обеспечивает устойчивость системы регулирования в заданных пределах изменения параметров системы.

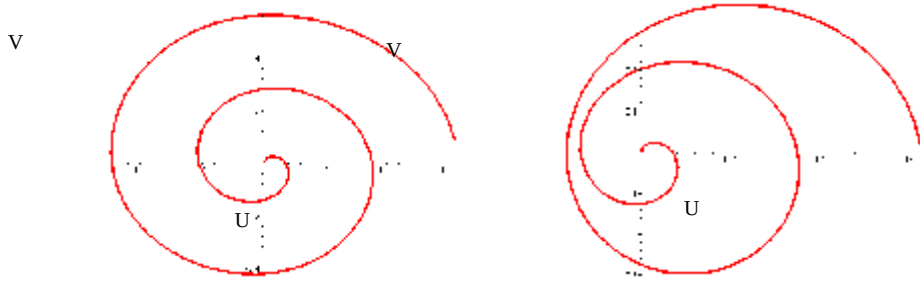


Рисунок 2 – Амплитудно-фазовая характеристика:
а) разомкнутой; б) замкнутой систем

В дальнейшем исследования данной проблемы можно проводить в направлении поиска других способов контроля выходной величины, например, с использованием лазерных или телеизмерительных средств.

Библиографический список

1. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления / Под ред. Л.Л. Товажнянского А.И. Грабченко — Харьков: Изд-во “Модель Вселенной”, 2002. — 140 с.
2. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. — 4-е изд. перераб. и доп. — СПб.: Изд-во “Профессия”, 2003. — 752 с.

Поступила в редакцию 10.04.2006 г.