

УДК 517.958

ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИНДУКЦИОННЫМ НАГРЕВОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СЛИТКОВ

С.А. Колпащиков

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: sKolpaschikov@mail.ru

Осуществлен синтез и исследование замкнутой системы управления по виду желаемого переходного процесса. Объектом управления выступает процесс индукционного нагрева, желаемая характеристика системы – оптимальная по быстродействию.

Ключевые слова: цифровой регулятор, индукционный нагрев, форма переходного процесса.

В качестве объекта управления рассматривается широко изученный [1, 2] процесс индукционного нагрева металлических изделий цилиндрической формы с сосредоточенным управляющим воздействием по мощности внутреннего тепловыделения. Данный процесс в линейном приближении описывается бесконечной системой дифференциальных уравнений для временных мод разложения температурного поля в ряд по собственным функциям радиальной координаты [2].

Известно решение задачи оптимального по быстродействию управления для данного объекта в классе программных управлений [2, 3]. Структура такого решения представляет собой бесконечное число параллельно соединенных типовых апериодических звеньев. На практике моделирование такой системы проводят усеченной структурой с ограниченным числом звеньев. Обоснование количества используемых звеньев также рассмотрено в работах [2, 3].

Объектом исследования выступает математическая модель процесса индукционного нагрева, приведенная в работе [3]. Модель усечена до 11 звеньев. На рис. 1 приведены графики изменения температуры в центре (1) и на поверхности (2) заготовки при оптимальном по быстродействию программном двухинтервальном управлении.

Далее решена задача синтеза замкнутой системы управления, обеспечивающей заданный вид переходной характеристики. В качестве желаемого вида переходной характеристики выбран график изменения температуры на поверхности заготовки при оптимальном по быстродействию программном управлении.

Синтез такого регулятора рассмотрен в работах [4, 5] и заключается в модификации апериодического регулятора [6] путем введения дополнительных фиктивных нулей и полюсов в передаточную функцию объекта управления. В работах [4, 5] предлагается методика расчета дополнительных нулей

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ №№ 14-08-00446, 15-08-04209, 15-08-01347.

Сергей Александрович Колпащиков (к.т.н.), доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

и полюсов исходя из вида желаемой переходной характеристики и точности ее отработки.

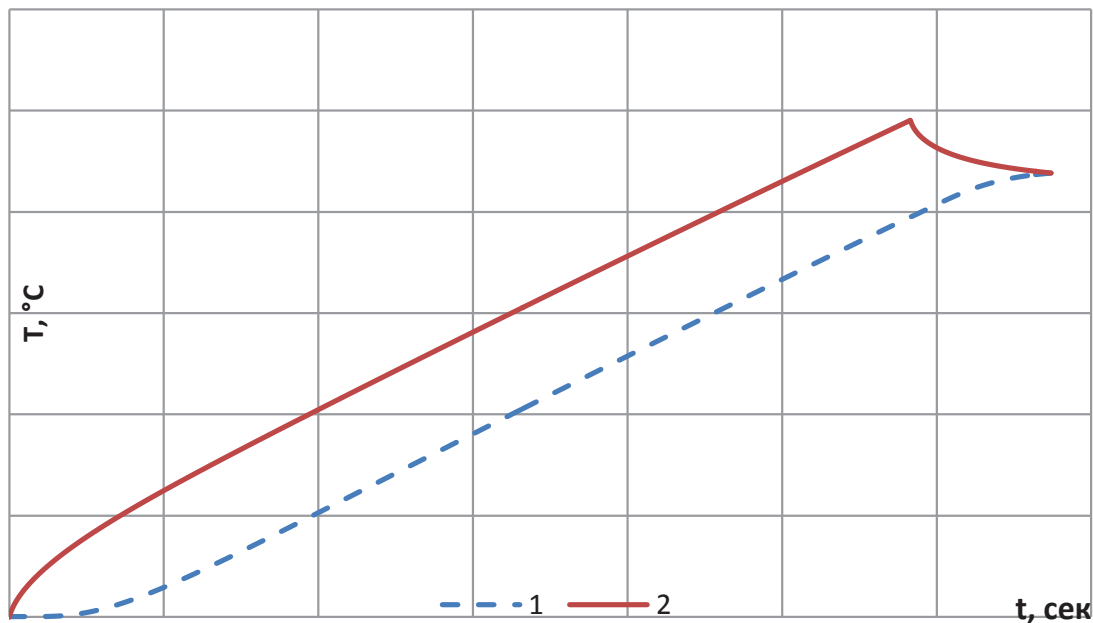


Рис. 1. Графики изменения температуры в центре (1) и на поверхности (2) заготовки при оптимальном по быстродействию программном двухинтервальном управлении

Для синтеза регулятора от непрерывной усеченной модели необходимо перейти к дискретной форме описания объекта управления. Регулятор замкнутой системы рассчитывается согласно формуле

$$G_p(z) = \frac{q_0 A(z) \prod_{i=1}^n (1 - z_i z^{-1})}{1 - q_0 B(z) \prod_{i=1}^n (1 - z_i z^{-1})}, \quad (1)$$

где $\prod_{i=1}^n (1 - z_i z^{-1})$ – корректирующий полином, $B(z)$ и $A(z)$ – полиномы соответственно числителя и знаменателя дискретной передаточной функции объекта управления, q_0 – величина, обратная сумме коэффициентов полинома B .

Корректирующий полином формируется на основе желаемой переходной характеристики системы из соотношения

$$\prod_{i=1}^n (1 - z_i z^{-1}) = \frac{\Delta Y(z)}{q_0 B(z)}, \quad (2)$$

где $\Delta Y(z)$ – первая разность желаемого переходного процесса.

Согласно [4, 5] для достижения требуемой точности отработки желаемой характеристики при делении полиномов в отрицательных степенях необходимо дополнить первую разность желаемого переходного процесса нулями, соответствующими установившемуся процессу. Количество дополнительных нулей определяется экспериментально путем моделирования синтезированной системы.

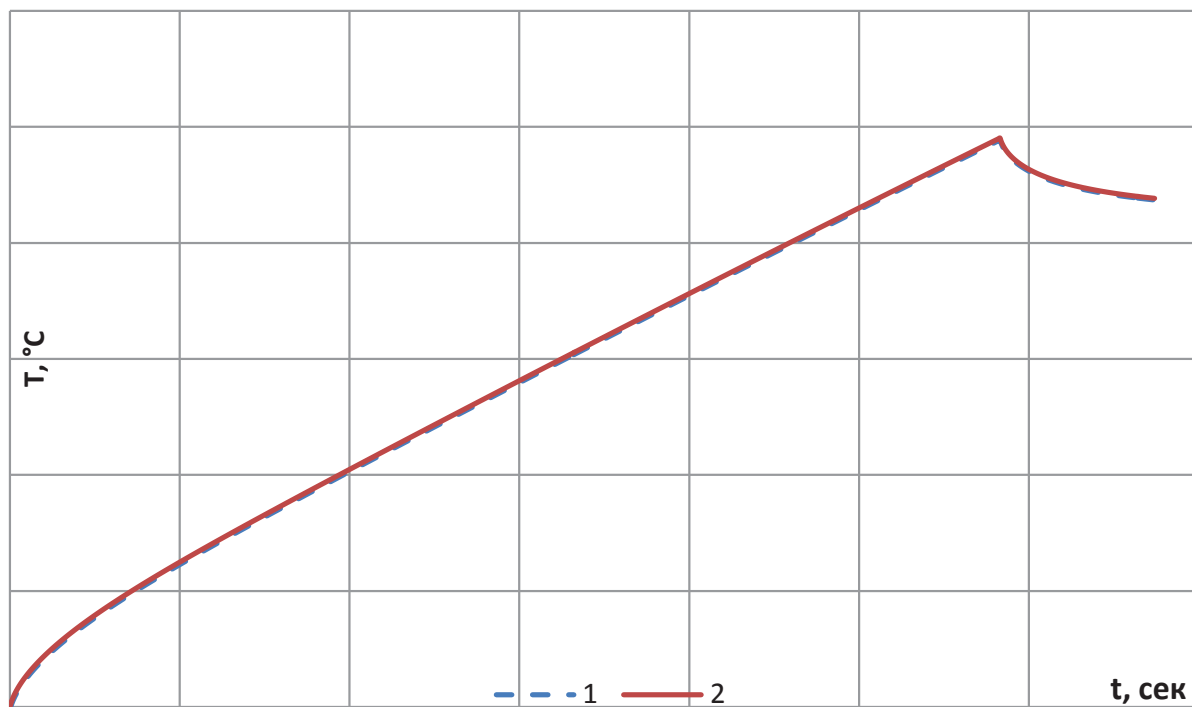


Рис. 2. Графики переходных процессов в синтезированной системе (1) и системе оптимального программного управления (2)



Рис. 3. График изменения управляющего воздействия в синтезированной системе (1) и системе оптимального программного управления (2)

Переходные процессы в синтезированной системе (1) и системе оптимального программного управления (2) представлены на рис. 2 и практически совпадают. На рис. 3 представлены графики изменения управляющего воздействия в синтезированной системе (1) и системе оптимального программного управления

(2). Из приведенных графиков видно, что синтезированная замкнутая система ведет себя аналогично оптимальной по быстродействию системе программного управления.

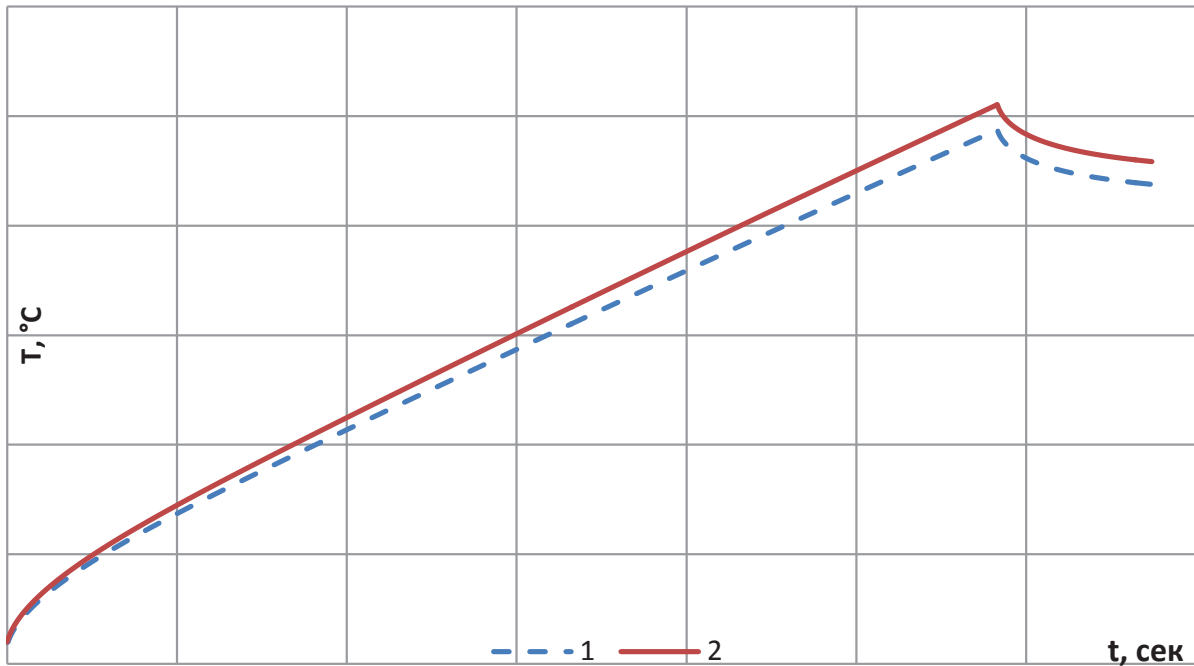


Рис. 4. Графики переходных процессов в синтезированной системе (1) и системе оптимального программного управления (2) при изменении температуры заготовки на $20\text{ }^{\circ}\text{C}$



Рис. 5. График изменения управляющего воздействия в синтезированной системе (1) и системе оптимального программного управления (2) при изменении температуры заготовки на $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Анализ результатов моделирования синтезированной системы при нанесении возмущения начальной температурой заготовки показал, что система отрабатывает возмущающее воздействие, переводя объект управления в заданное состояние, тогда как система программного управления перегревает заготовку на величину возмущения (рис. 4).

Форма управляющего воздействия и время переключения интервалов при этом не изменяются, но меняется величина управляющего воздействия на первом интервале (рис. 5).

Синтезированная замкнутая система может использоваться для управления индукционным нагревом в случае, когда начальная температура заготовки варьируется в определенном диапазоне. Замкнутая система должна быть синтезирована по переходному процессу, оптимальному для нижней границы диапазона допустимых начальных температур заготовки. В этом случае во всем диапазоне возмущений система будет обеспечивать нагрев до заданной температуры за одинаковое время.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. – М.: Наука, 2012. – 309 с.
2. Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами – М.: Высшая школа, 2009. – 677 с.
3. Левин И.С. Моделирование оптимальной по быстродействию системы управления процессом индукционного нагрева в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 3 (39). – С. 167–174.
4. Колпашников С.А. Автоматизация и контроль технологического процесса наложения изоляции кабелей связи с парной структурой: автореф. дис. ... канд. техн. наук / СамГТУ. – Самара: СамГТУ, 2004. – 20 с.
5. Чостковский Б.К. Методы и системы оптимального управления технологическими процессами производства кабелей связи: Монография. – М.: Машиностроение, 2009. – 190 с.
6. Изерман Р. Цифровые системы управления: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984.

Статья поступила в редакцию 10 апреля 2016 г.

DIGITAL CONTROL SYSTEM OF INDUCTION HEATING PROCESSES OF CYLINDRICAL BILLETS

S.A. Kolpashchikov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

This paper presents the synthesis of the time-optimal closed loop system to control the process of induction heating based on the shape of transient process. The shape of transient process is obtained from time-optimal program control.

Keywords: digital control, induction heating, shape of transient process.