

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.

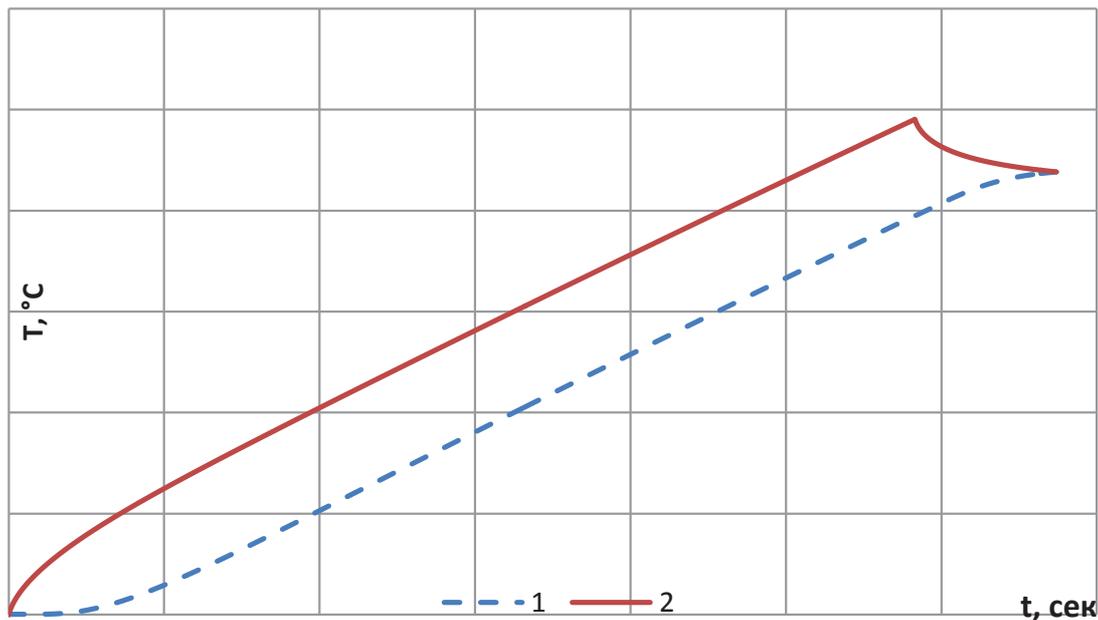


Рис. 1. Графики изменения температуры в центре (1) и на поверхности (2) заготовки при оптимальном по быстродействию программном двухинтервальном управлении

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.

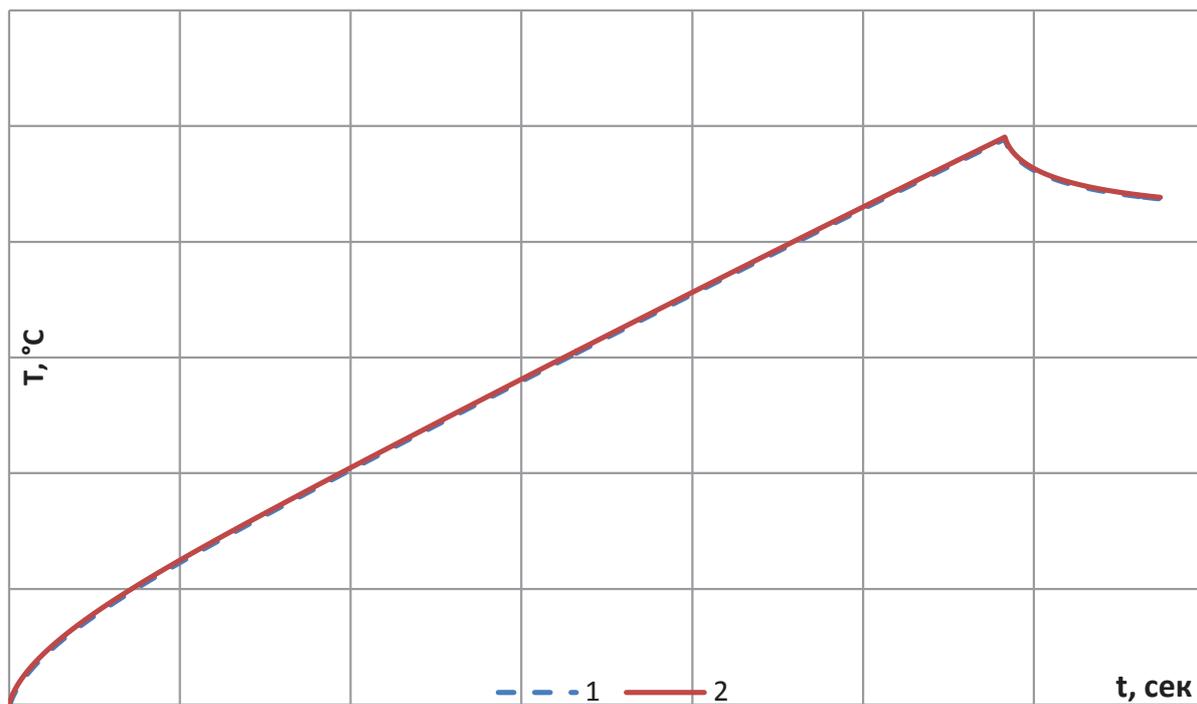


Рис. 2. Графики переходных процессов в синтезированной системе (1) и системе оптимального программного управления (2)



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.

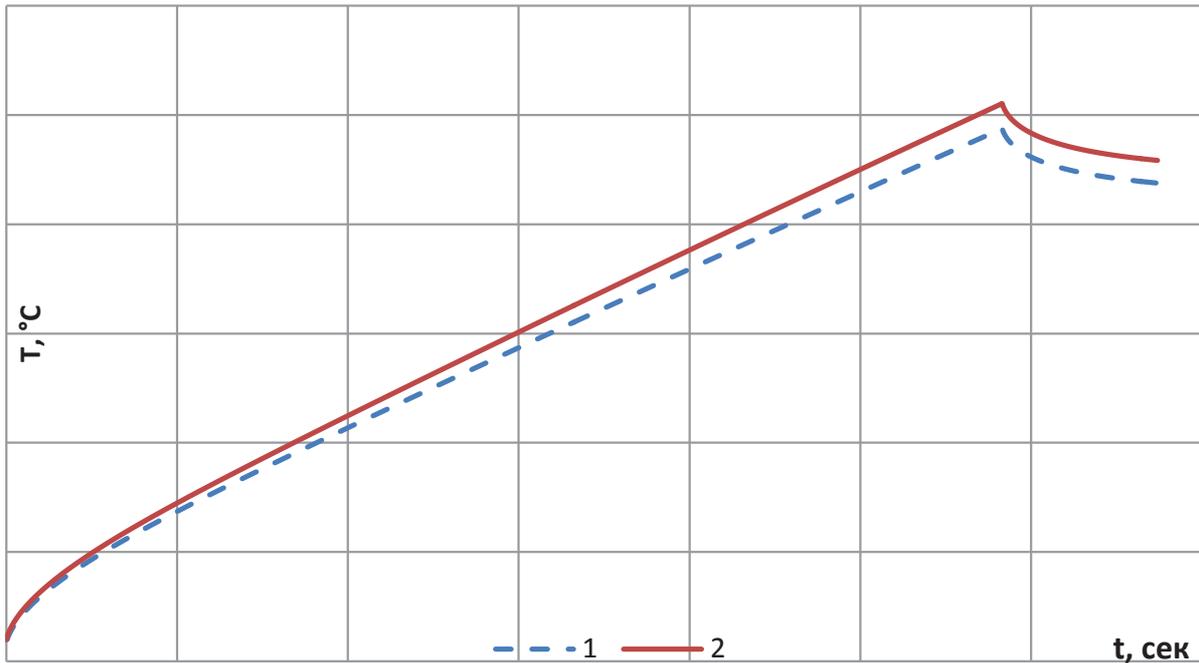


Рис. 4. Графики переходных процессов в синтезированной системе (1) и системе оптимального программного управления (2) при изменении температуры заготовки на  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$



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.