

УДК 666.3.187:519.876.5

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОБПАЛЮВАННЯ КЕРАМІЧНОЇ ПЛИТКИ

ЧУМАК Л. І.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,

УЖЕЛОВСЬКИЙ В. О.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,

ЧЕРНЕНКО В. О.<sup>3</sup>, студ.

<sup>1</sup>Кафедра автоматики та електротехніки, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 765-3-19, e-mail: chumakli51@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2640-6247

<sup>2</sup>Кафедра автоматики та електротехніки, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 765-3-19, e-mail: valentinuzelovsky@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7328-8226

<sup>3</sup>Кафедра автоматики та електротехніки, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (050) 452-35-05, e-mail: chernenko.valeriia.95@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7315-7832

**Анотація.** Наведено результати досліджень математичної моделі процесу обпалювання керамічної плитки у щільній печі, з урахуванням динаміки теплового процесу для визначення параметрів устаткування і раціонального закону регулювання температури. Реалізація моделі в середовищі MATLAB Simulink дозволила провести оптимізацію системи. **Мета.** Розробити і провести дослідження математичної моделі, враховуючи динаміку теплового процесу для визначення параметрів устаткування і раціонального закону регулювання температури, що дозволить підвищити якість керамічної плитки та зменшити енергоємність. **Методика.** В якості об'єкту для дослідження прийнята щільна піч для обпалювання керамічної плитки. Досліджувався вплив керуючих і збурюючих чинників на величину температури у печі. На основі отриманих даних, визначене рівняння динаміки об'єкту та передаточна функція щільної печі за керуючим впливом. Для виконання оптимізації системи регулювання процесу обпалювання розроблено блок-схему моделі процесу, реалізованої в середовищі Simulink пакету програми MATLAB 6.5. **Результати.** У результаті виконання математичного моделювання процесу обпалювання керамічної плитки у щільній печі визначено рівняння динаміки об'єкту, передаточну функцію печі за керуючим впливом, проведені розрахунки динамічних параметрів системи з подальшим їх моделюванням за допомогою прикладної програми Simulink пакету моделювання MATLAB 6.5. Проведено оптимізацію системи. **Наукова новизна.** Створена імітаційна модель печі обпалювання, з урахуванням зовнішніх чинників та визначені раціональні динамічні параметри елементів системи, устаткування і раціонального закону регулювання температури. **Практична значимість.** Розроблена і реалізована за допомогою програми MATLAB 6.5 блок-схема математичної моделі процесу обпалювання керамічної плитки та її імітаційна модель, що дозволяє на стадії проектування та налагодження визначити раціональний і бажаний час перехідного процесу, оптимізувати систему, поліпшити якість регулювання процесу обпалювання, зменшити витрати теплоносія.

**Ключові слова:** математична модель; обпалювання; керамічна плитка; оптимізація

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖИГА КЕРАМИЧЕСКОЙ ПЛИТКИ

ЧУМАК Л. И.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,

УЖЕЛОВСКИЙ В. А.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,

ЧЕРНЕНКО В. А.<sup>3</sup>, студ.

<sup>1</sup>Кафедра автоматики и электротехники, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 465-3-19, e-mail: chumakli51@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2640-6247

<sup>2</sup>Кафедра автоматики и электротехники, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 465-3-19, e-mail: valentinuzelovsky@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7328-8226

<sup>3</sup>Кафедра автоматики и электротехники, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 452-35-05, e-mail: chernenko.valeriia.95@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7315-7832

**Аннотация.** Приведены результаты исследований математической модели процесса обжига керамической плитки в щелевой печи, с учетом динамики теплового процесса для определения параметров оборудования и рационального закона регулирования температуры. Реализация модели в среде MATLAB Simulink позволила провести оптимизацию системы. **Цель.** Разработать и провести исследование математической модели, учитывая динамику теплового процесса для определения параметров оборудования и рационального закона регулирования температуры, что позволит повысить качество керамической плитки и уменьшить энергоёмкость. **Методика.** В качестве объекта для исследования принята щелевая печь для обжига

керамической плитки. Исследовалось влияние управляющих и возмущающих факторов на величину температуры в печи. На основе полученных данных, определено уравнение динамики объекта и передаточная функция щелевой печи с управляющим воздействием. Для выполнения оптимизации системы регулирования процесса обжига разработана блок-схема модели процесса, реализованная в среде Simulink пакета программы MATLAB 6.5. **Результаты.** В результате выполнения математического моделирования процесса обжига керамической плитки в щелевой печи определены уравнения динамики объекта, передаточная функция печи с управляющим воздействием, проведены расчеты динамических параметров системы с последующим их моделированием с помощью приложения Simulink пакета моделирования MATLAB 6.5. Проведена оптимизация системы. **Научная новизна.** Создана имитационная модель печи обжига, с учетом внешних факторов и определены рациональные динамические параметры элементов системы, оборудования и рационального закона регулирования температуры. **Практическая значимость.** Разработана и реализована с помощью программы MATLAB 6.5 блок-схема математической модели процесса обжига керамической плитки и ее имитационная модель, позволяющая на стадии проектирования и отладки определить рациональное и желаемое время переходного процесса, оптимизировать систему, улучшить качество регулирования процесса обжига, уменьшить расходы теплоносителя.

**Ключевые слова:** математическая модель; обжиг; керамическая плитка; оптимизация

## MATHEMATICAL MODELING OF THE CERAMIC TILE BURNING PROCESS

CHUMAK L. I.<sup>1</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,  
UZELOVSKY V. O.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,  
CHERNENKO V. O.<sup>3</sup>, *student*

<sup>1</sup>Department of Automation and Electrical Engineering, State Higher Education Establishment «Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 465-3-19, e-mail: chumakli51@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2640-6247

<sup>2</sup>Department of Automation and Electrical Engineering, State Higher Education Establishment «Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, тел. +38 (0562) 465-3-19, e-mail: valentinuzelovsky@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7328-8226

<sup>3</sup>Department of Automation and Electrical Engineering, State Higher Education Establishment «Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, тел. +38 (050) 452-35-05, e-mail: chernenko.valeriia.95@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7315-7832

**Annotation.** The results of investigations of the mathematical model of the process of firing ceramic tiles in a slot furnace are given, taking into account the dynamics of the thermal process for determining the parameters of the equipment and the rational temperature control law. The implementation of the model in the MATLAB Simulink environment made it possible to optimize the system. **Purpose.** Develop and conduct a study of the mathematical model, taking into account the dynamics of the thermal process for determining the parameters of equipment and the rational law of temperature control, which will improve the quality of ceramic tiles and reduce energy intensity. **Methodology.** As an object for the study, a slot furnace for baking ceramic tiles was adopted. The influence of controlling and disturbing factors on the temperature in the furnace was investigated. On the basis of the obtained data, the equation of the object dynamics and the transfer function of the slit furnace with the control action are determined. To perform optimization of the firing process control system, a block diagram of the process model implemented in the Simulink environment of the MATLAB 6.5 software package was developed. **Findings.** As a result of the mathematical modeling of the ceramic tile firing process in the slot furnace, the equations of the object dynamics, the transfer function of the furnace with the control action are determined, the dynamic parameters of the system are calculated and then modeled using the Simulink simulation package of the MATLAB 6.5. Optimization of the system was carried out. **Originality.** An imitation model of a roasting kiln was created, taking into account external factors and rational parameters of the elements of the system, equipment and rational temperature control law were determined. **Practical value.** The block diagram of the mathematical model of the ceramic tile firing process and its simulation model developed and implemented with the help of MATLAB 6.5 software allows to determine the rational and desired time of the transient process at the design and debug stage, optimize the system, improve the quality of the firing process, and reduce the coolant flow.

**Keywords:** mathematical model; firing; ceramic tile; optimization

**Вступ.** Процеси теплової обробки в будівельній індустрії мають велике значення для якості готової продукції, економіки виробництва. Однією з найважливіших операцій у технології виробництва керамічної плитки є обпалювання, яке

займає до 50% тривалості виробничого циклу. Підвищення якості продукції за рахунок удосконалення технологічного процесу і режиму обпалювання – одне з основних завдань у цій галузі [2].

Аналітичний метод дослідження об'єкта управління (ОУ), що базується на використанні загальних фізичних законів, які описують відповідні процеси, що включає наступні етапи: визначаємо завдання – вплив на об'єкт, вхідні й вихідні величини; побудова моделі; аналіз прийнятих допущень; знаходження коефіцієнтів і складання передаточної функції [4].

Модель об'єкта керування може бути знайдена на підставі аналізу фізичних законів. В основі цього лежить застосування методу малих відхилень, сутність якого зводиться до наступного. Змінним параметрам рівняння балансу дають малі збільшення. Потім з отриманого рівняння віднімають вихідне й результат ділять на збільшення часу  $\Delta t \rightarrow 0$ . Знайдене відношення й буде являти собою математичну модель об'єкта [1].

Рівняння теплового балансу для повітря щілинної печі має вигляд:

$$Q_1 - Q_2 - Q_3 = 0, \quad (1)$$

де  $Q_1$ ,  $Q_2$  – тепловий потік, що відповідно надходить у піч з пальників, що йде з повітрям (через вентиляцію);  $Q_3$  – втрати теплоти через стінки печі.

Слід зазначити, що в цьому випадку потоки  $Q_1$ ,  $Q_2$  – керуючі, а  $Q_3$ , – вплив збурення на об'єкт.

Регулюємою величиною є величина, яка підлягає регулюванню – це температура повітря. Завдання дослідження полягає у встановленні залежності температури від зміни вхідних величин (керуючих і що збурюють) [1].

У розглянутому випадку основним фізичним законом, що зв'язує залежність температури в об'єкті від керуючих впливів і впливів, що збурюють, є закон збереження енергії, згідно якого можна записати залежність для об'єкта в наступному виді:

$$cm \frac{d\Theta}{dt} = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (2)$$

де  $c$  – теплоємність речовини;  $m$  – маса речовини в об'ємі;  $t$  – температура речовини;  $Q_i$  – теплові потоки, що впливають на речовину [1].

Необхідно відзначити, що піч складається із двох фізичних тіл: повітря й стінок печі, теплофізичні властивості яких різко відрізняються один від іншого. Тоді теплообмін між повітрям усередині печі й зовнішнім середовищем запишеться системою рівнянь у відхиленнях:

$$\begin{cases} c_n m_n \frac{d\Delta\theta_n}{dt} = \Delta Q_1 - \Delta Q_2 - Q_3 \\ c_{ст} m_{ст} \frac{d\Delta\theta_{ст}}{dt} = \Delta Q_3 - \Delta Q_4 \end{cases} \quad (3)$$

де  $c_n, c_{ст}$  – питомі теплоємності повітря й стінок печі;  $m_n, m_{ст}$  – маси повітря й стінок печі;  $\Delta\theta_n, \Delta\theta_{ст}$  – відхилення температур повітря й стінок печі від розрахункових у сталому режимі;  $\Delta Q_1, \Delta Q_2, \Delta Q_3, \Delta Q_4$  – відхилення від розрахункових значень теплових потоків відповідно із поступаючим у піч повітрям, що йде через вентиляцію, від повітря усередині печі до стінок печі й від стінок печі до зовнішнього повітря [1].

Слід зазначити, що, оскільки тепловиділення печі прийняте постійним, складова теплових потоків  $\Delta Q_4 = 0$  і тому в систему рівнянь вона не ввійшла.

Система рівнянь (3) описує об'єкт, який досліджується із деякою ідеалізацією. При складанні рівнянь прийняті такі допущення: піч розглядається як лінійний об'єкт із зосередженими параметрами; щільність повітря не залежить від температури й тиску усередині печі; час переміщення повітря усередині печі не враховується; тепловиділення печі прийняте постійним.

Оцінка впливу прийнятих допущень на результати аналізу показує, що помилки, які виникають не виходять за межі припустимих при інженерних розрахунках теплоенергетичних процесів [1].

Для визначення рівнянь динаміки об'єкта необхідно в систему рівнянь (3) замість теплових потоків підставити їхні значення, які виражені через питомі теплоємності, маси, перепади температур, площі поверхонь теплопередачі й коефіцієнт теплообміну:

$$\begin{cases} c_n m_n \frac{d\Delta\theta_n}{dt} = c_n \Delta m_{пв} (\theta_{пв} - \theta_n) - c_n \Delta m_n (\theta_n - \theta_{нар}) - F_{ст} \alpha_{вн} (\Delta\theta_n - \Delta\theta_{ст}) \\ c_{ст} m_{ст} \frac{d\Delta\theta_{ст}}{dt} = F_{ст} \alpha_{вн} (\Delta\theta_n - \Delta\theta_{ст}) - F_{ст} \alpha_{зовн} (\Delta\theta_{ст} - \Delta\theta_3) \end{cases} \quad (4)$$

де  $\Delta m_{пв}$ ,  $\Delta m_{в}$  - приріст маси внутрішнього повітря, яке подається, кг/с;  $F_{ст}$  - площа стінок печі,  $m^2$ ;  $\alpha_{вн}$ ,  $\alpha_{зовн}$  - коефіцієнти теплообміну на внутрішніх і зовнішніх поверхнях стінок печі,  $Вт/(m^2 \cdot C)$ ;  $\Delta\theta_{зовн}$ ,  $\Delta\theta_{в}$ ,  $\Delta\theta_{ст}$  - збільшення температури зовнішнього й внутрішнього повітря й стінок печі,  $^{\circ}C$ ;  $\theta_{пв}$ ,  $\theta_{в}$ ,  $\theta_{зовн}$  - температури, яка подається, внутрішнього й зовнішнього повітря [1].

З огляду на  $\Delta m_{в} = \Delta m_{пв}$ , спрощено перше рівняння системи (4):

$$c_n m_n \frac{d\Delta\theta_{в}}{dt} = c_n \Delta m_{в} (\theta_{пв} - 2\theta_{в} + \theta_{зовн}) - F_{ст} \alpha_{зовн} (\Delta\theta_{в} - \Delta\theta_{ст}), \quad (5)$$

з якого

$$\Delta\theta_{ст} = \frac{c_n m_n}{F_{ст} \alpha_{вн}} C + \Delta\theta_{в} - \frac{c_n \Delta m_{в} (\theta_{пв} - 2\theta_{в} + \theta_{зовн})}{F_{ст} \alpha_{вн}}. \quad (6)$$

Значення  $\Delta\theta_{ст}$  підставимо в друге рівняння системи (4) і після перетворень отримаємо:

$$\frac{c_{ст} m_{ст} c_n m_n}{F_{ст}^2 \alpha_{вн} \alpha_{зовн}} \frac{d^2 \Delta\theta_{в}}{dt^2} + \frac{c_{ст} m_{ст} \alpha_{вн} + c_n m_n (\alpha_{вн} + \alpha_{зовн})}{F_{ст} \alpha_{вн} \alpha_{нар}} \frac{d\Delta\theta_{в}}{dt} + \Delta\theta_{вн} = \frac{c_n (\alpha_{вн} + \alpha_{нар}) (\theta_{пв} - 2\theta_{в} + \theta_{зовн})}{F_{ст} \alpha_{вн} \alpha_{зовн}} \left[ \frac{c_{ст} m_{ст}}{F_{ст} (\alpha_{вн} + \alpha_{зовн})} \frac{d\Delta m_{в}}{dt} + \Delta m_{в} \right] + \Delta\theta_{зовн} \quad (7)$$

У канонічній формі рівняння динаміки печі має вигляд:

$$T_0^2 \frac{d^2 \Delta\theta_{в}}{dt^2} + T_1 \frac{d\Delta\theta_{в}}{dt} + \Delta\theta_{в} = k (T_2 \frac{d\Delta m_{в}}{dt} + \Delta m_{в}) + \theta_{зовн}, \quad (8)$$

де

$$T_0^2 = \frac{c_{ст} c_n m_{ст} m_n}{F_{ст} \alpha_{вн} \alpha_{зовн}};$$

$$T_1 = \frac{c_{ст} m_{ст} \alpha_{вн} + c_n m_n \alpha_{вн} + c_v m_v \alpha_{зовн}}{F_{ст} \alpha_{вн} \alpha_{зовн}};$$

$$T_2 = \frac{c_{ст} m_{ст}}{F_{ст} (\alpha_{вн} + \alpha_{зовн})};$$

$$k = \frac{c_n (\alpha_{вн} + \alpha_{зовн}) (\theta_{пв} - 2\theta_{в} + \theta_{зовн})}{F_{ст} \alpha_{вн} \alpha_{зовн}}.$$

Передаточна функція щілинної печі за керуючим впливом:

$$W(p) = \frac{\Delta\theta_{в}(p)}{\Delta m_{в}(p)} = \frac{k(T_2 p + 1)}{T_0^2 p^2 + T_1 p + 1} \quad (9)$$

Числові значення коефіцієнтів, що входять у передатну функцію, визначаємо з наступних параметрів щілинної печі:  $V_{п} = 20,7 m^3$ ,

$$V_{ст} = 505,2 m^3, m_{п} = 0,011 \text{ кг},$$

$$\alpha_{в} = 2000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{C}, \alpha_{зовн} = 2000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{C},$$

$$m_{ст} = 34602,57 \text{ кг}, c_{ст} = 880 \text{ дж/кг} \cdot \text{C},$$

$$c_{п} = 1005 \text{ дж/кг} \cdot \text{C}, F_{ст} = 63,7 m^2,$$

$$\theta_{в} = 1050 \text{ }^{\circ}C, \theta_{пв} = 1300 \text{ }^{\circ}C, \theta_{зовн} = 20 \text{ }^{\circ}C.$$

У результаті розрахунків за вище наведеними формулами отримано:  $T_0^2 = 20,74 \text{ с}^2$ ;  $T_1 = 60,90 \text{ с}$ ;  $T_2 = 119,5 \text{ с}$ ;  $k = 12,9 \text{ }^{\circ}C \cdot \text{с/кг}$ .

Оскільки величина  $T_0^2$  на три порядки менше величини  $T_1$ , то нею можна знехтувати [1].

Передаточна функція щілинної печі – об'єкта регулювання (ОР):

$$W(p) = \frac{\Delta\theta_{в}(p)}{\Delta m_{в}(p)} = \frac{12,9(119,5 p + 1)}{60,90 p + 1}$$

Для виконання оптимізації системи регулювання розглянуто процес обпалювання керамічних виробів [3, 4], розроблено структурну схему системи автоматичного регулювання (САР). (рис.1)

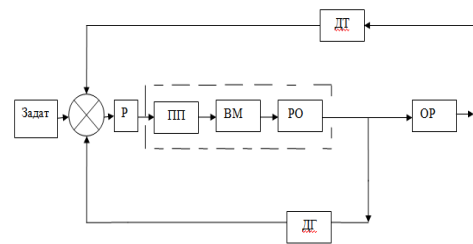


Рис. 1 Структурна схема САР обпалювання керамічної плитки

ПП – підсилювач потужності, пускач; ВМ – виконавчий механізм, МЭО; Р – регулятор, комп'ютер; РО – регулюючий орган, заслінка; ОР – об'єкт регулювання, щілинна піч; ДТ – датчик температури, термопара; ДГ – датчик якості глазури.

Виконано розрахунок динамічних параметрів системи з подальшим їх моделюванням за допомогою прикладної

програми Simulink пакету моделювання Matlab 6.5. [5,6,7].

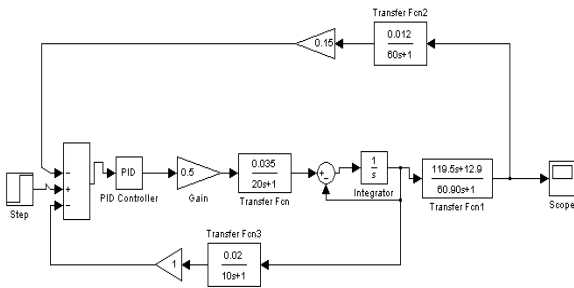


Рис. 2 Блок-схема моделі процесу обпалювання керамічної плитки реалізована в середовищі Simulink

Розрахунок динамічних параметрів датчиків виконується згідно їх технологічних параметрів [5]:

Передаточна функція датчика температури [8]:

$$W_{дт} = \frac{k}{T_d * p + 1} \quad (10)$$

$$k = \frac{X_{вых}}{X_{вх}} = \frac{12}{1000} = 0,012 \left( \frac{B}{C^{\circ}} \right) \quad (11)$$

$$T=60 \text{ (с)}$$

$$W_{дт} = \frac{0,012}{60 * p + 1} \quad (12)$$

Передаточна функція датчика якості глазури:

$$W_{дт} = \frac{k}{T_2 * p + 1} \quad (13)$$

$$T=10 \text{ (с)}$$

$$W_{дт} = \frac{0,02}{10 * p + 1} \quad (14)$$

$$k = \frac{I}{Я} = \frac{20}{1000} = 0,02 \left( \frac{A}{мл} \right) \quad (15)$$

Передаточна функція виконавчого механізму:

$$W_{BM}(p) = \frac{\Theta(p)}{Uk(p)} \quad (16)$$

$$W_{BMPO} = \frac{0,035}{20 * p + 1} \quad (17)$$

Регулятор представлений на схемі блоком PID-Controller.

V, B

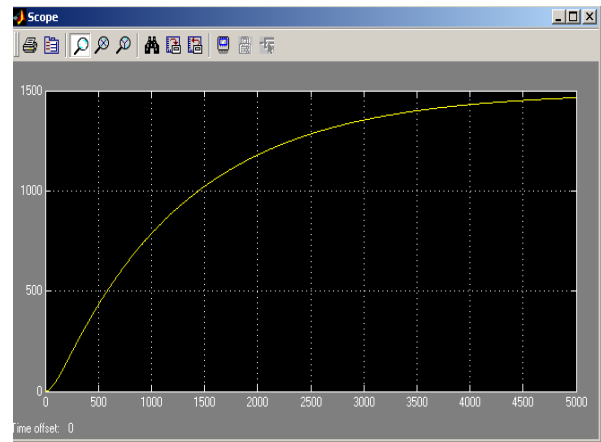


Рис.3 Перехідний процес системи до оптимізації

t,с

V, B

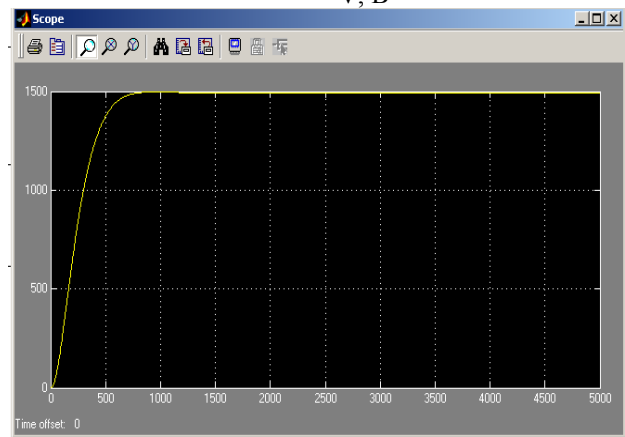


Рис.4 Перехідний процес системи після оптимізації

t,с

**Висновок:** в результаті виконання математичного моделювання знайдено передаточну функцію системи автоматизованого регулювання процесу обпалювання керамічної плитки, побудовано перехідний процес. За допомогою програми MATLAB проведено оптимізацію системи. За відсутністю налаштувань ПІД-регулятора був невизначений час розгону кривої. Після налаштувань регулятора, час перехідного процесу був зменшений до 1200 секунд.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мартыненко И. И. Проектирование систем автоматики / И. И. Мартыненко, В. Ф. Лысенко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Агропромиздат, 1990. – 243 с. – (Учеб. и учеб. пособия для студ. высш. учеб. заведений).
2. Тепловые процессы в технологии силикатов / А. В. Ралко, А. А. Крупа, Н. Н. Племянников и др. – Киев : Вища шк., 1986. – 232 с.
3. А. с. 857074 СССР, МКІ<sup>3</sup> С 04 В 33/32. Способ автоматического регулирования процесса обжига керамических изделий в щелевой печи / В. И. Кубанцев, А. К. Тарасов, А. Н. Калинин, Г. В. Матвеев, А. С. Соколов (СССР). – № 2836737/29-33 ; заявл. 06.11.1979 ; опубл. 23.08.1981, Бюл. № 31. – 3 с.
4. Автоматизация производственных процессов и АСУП промышленности строительных материалов : учеб. для техникумов пром-сти строит. материалов / под ред. В. С. Кочетова. – Изд. 2-е, перераб и доп. – Ленинград : Стройиздат, 1981. – 456 с.
5. Бейко И. В. Методы и алгоритмы решения задач оптимизации / И. В. Бейко, Б. Н. Бублик, П. Н. Зинько. – Киев : Высшая школа, 1983. – 512 с.
6. Дьяконов В. Simulink 4 : Специальный справочник / В. Дьяконов. – Санкт-Петербург : Питер, 2002. – 528 с.
7. Дьяконов В. Mathcad 2000 : учебный курс / В. Дьяконов. – Санкт-Петербург : Питер, 2000. – 592 с.
8. Попович М. Г. Теорія автоматичного керування : підруч. для студ. ВНЗ / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. – 2-ге вид., перероб. і доп. – Київ : Либідь, 2007. – 656 с.

### REFERENCES

1. Martynenko I.I. and Lysenko V.F. *Proektirovanie sistem avtomatiki* [Design of automation systems].ed. 2. Moskva: Agropromizdat, 1990, 243 p. (in Russian).
2. Ralko A.V., Krupa A.A. and Plemyannikov N. N. *Teplovye processy v texnologii silikatov* [Thermal processes in silicate technology]. Kiev: Vysshha shk., 1986, 232 p. (in Russian).
3. Kubancev V.I., Tarasov A.K., Kalinin A.N., Matveev G.V. and Sokolov A.S. *A. s. 857074 SSSR, MKI<sup>3</sup> S 04 V 33/32. Sposob avtomaticheskogo regulirovaniya processa obzhiga keramicheskix izdelij v shhelevoj pechi* [Certificate of authorship 857074 USSR, MKI<sup>3</sup> S 04 V 33/32. A method for automatically regulating the process of firing ceramic products in a slot furnace]. No. 2836737/29-33, tastement 06.11.1979, published on 23.08.1981, no. 31, 3 p. (in Russian).
4. Kochetova V.S. *Avtomatizaciya proizvodstvennyx processov i ASUP promyshlennosti stroitel'nyx materialov* [Automation of production processes and automated control systems of the building materials industry].ed. 2. Leningrad: Strojizdat, 1981, 456 p. (in Russian).
5. Bejko I.V., Bublik B.N. and Zin'ko P.N. *Metody i algoritmy resheniya zadach optimizacii* [Methods and algorithms for optimization problems solving]. Kiev: Vysshaya shkola, 1983, 512 p. (in Russian).
6. D'yakonov V. *Simulink 4: Special'nyj spravochnik* [Simulink 4: Special reference book]. Sankt-Peterburg: Piter, 2002, 528 p. (in Russian).
7. D'yakonov V. *Mathcad 2000: uchebnyj kurs* [Mathcad 2000: training course]. Sankt-Peterburg: Piter, 2000, 592 p. (in Russian).
8. Popovich M.G. and Kovalchuk O.V. *Teoriia avtomatichnoho keruvannia* [The theory of automatic control].ed. 2. Kyiv: Lybid, 2007, 656 p. (in Ukrainian).

*Рецензент: Дерев'яно В. М. д-р техн. наук, проф.*

Надійшла до редколегії: 17.10.2017 р.

Прийнята до друку: 27.10.2017 р.