

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИТРИМКИ ЗАЛІЗОБЕТОННОГО ВИРОБУ ПРИ ТЕПЛОВОЛОГІЙ ОБРОБЦІ У ФОРМІВНОМУ СТЕНДІ

Л. І. Чумак, к. т. н., доц., Н. М. Латини, магістр

Ключові слова: математична модель, тепловолога обробка, витримка, залізобетонний виріб, регулювання, температура, оптимізація

Постановка проблеми. Основними завданнями для інтенсифікації виробництва залізобетонних виробів є підвищення якості продукції, економія матеріальних та енергетичних ресурсів. Виконання цих завдань неможливе без комплексної автоматизації виробничих процесів, оптимізації технологічних режимів та управління процесами виробництва. Виробничий процес тепловологої обробки залізобетонних виробів – важливий, відповідальний і найбільш енергоємний етап при їх виготовленні. В даний час і в осяжному майбутньому виготовлення залізобетонних виробів залишається переважним способом випуску конструкційних матеріалів для будівництва. Це пояснюється практично необмеженими ресурсами сировини для виготовлення в'язучих сумішей і заповнювачів, невеликою витратою сталевих арматур, високими конструкторськими і експлуатаційними якостями залізобетону, його відносно низькою енергоємністю. Щоб знизити витрати на виробництво, використовують формівні стенди, теплоносієм є гаряча вода, що дозволяє значно зменшити економічні затрати. Якість готового залізобетонного виробу (ЗБВ) характеризується його міцністю. Міцність ЗБВ залежить від параметрів якості, що формуються в процесі витримки.

Аналіз публікацій. Питання управління процесом ізотермічної витримки залізобетонного виробу раніше розглядалися такими відомими вченими як Л. А. Малініна, А. А. Афанасьєв, Є. І. Шмитько, І. І. Мартиненко, В. Ф. Лисенко та ін. Ці дослідження були ефективними, але мали великі економічні витрати. Для зниження затрат на виробництво залізобетонних виробів пропонується використовувати формівний стенд та замінити теплоносій на гарячу воду. Аналіз досліджень [2; 7] показав, що з метою підвищення точності управління додатково вимірюють температуру на поверхні виробу, температуру суміші в об'ємі стенда порівнюють із заданою, а різницю сигналів використовують для управління подачею додаткової теплової енергії. Для спрощення системи управління пропонується визначити параметри устаткування та раціональний закон регулювання температури, провести оптимізацію системи та зменшити час регулювання, що дозволить підвищити якість виробу.

Мета статті – розробити і провести дослідження математичної моделі процесу витримки залізобетонного виробу при тепловологісній обробці у формівному стенді, враховуючи динаміку теплового процесу для визначення параметрів устаткування і раціонального закону регулювання температури, щоб підвищити якість залізобетонного виробу та зменшити економічні затрати.

Виклад матеріалу. Моделювання – це процес дослідження об'єктів пізнання за допомогою їх моделей. При цьому дослідник має справу не з реальним об'єктом, а з його моделлю. Результати дослідження моделі переносяться на реальний об'єкт.

Математична модель процесу являє собою залежність вихідних величин процесу від вхідних параметрів. Вона створюється на основі теорії термодинаміки. Модель об'єкта управління може бути знайдена на підставі аналізу фізичних законів. В основі цього лежить застосування методу малих відхилень як змінного параметра, що входить у рівняння теплового балансу. Потім з одержаного рівняння віднімають вихідні і результат ділять на приріст часу. Отримане співвідношення є математичною моделлю процесу витримки залізобетонного виробу [1].

Рівняння теплового балансу зони витримки залізобетонного виробу при тепловологісній обробці у формівному стенді має вигляд:

$$Q_1 - Q_2 - Q_3 = 0 \tag{1}$$

При цьому приймається, що залізобетонний виріб у зоні витримки несе рівну частку тепла. Крім того, зміни, що відбуваються із залізобетонним виробом, не змінюють кількості тепла в процесі витримки. Тоді в рівнянні (1) ураховуються такі потоки тепла:

Q_1 – тепловий потік, що йде з теплообмінника на виріб;

Q_2 – тепловий потік, що залишає зону витримки;

Q_3 – потік теплових втрат через огороження формівного стенда – зони витримки.

У цьому випадку не враховуються теплові потоки втрат через підсмоктувачі, потоки між зоною охолодження і витримки, вплив підсмоктувань за рахунок теплоносіїв – ці потоки є неконтрольованими збуреннями, а також потоки тепла, що виходять із зони разом із залізобетонним виробом.

Слід зазначити, що потоки Q_1 і Q_2 – керуючі, а Q_3 – збурення. Регульованою величиною є температура θ_{II} у зоні витримки. Завдання дослідження полягає у встановленні залежності цієї температури від зміни вхідних величин (керуючих і збурювальних) із часом.

Основним фізичним законом, що зв'язує температуру повітря в зоні витримки θ_{II} від керуючих і збурювальних впливів, є закон збереження енергії, який для процесу витримки виробів можна записати так:

$$cm \frac{d\theta}{d\theta} = \sum_I^N Q \quad (2)$$

де c – теплоємність речовини, кДж/(кг×°C);

m – маса речовини в об'ємі, кг;

θ – температура речовини, °C;

Q – теплові потоки, що впливають на речовину.

Передбачається, що зона витримки складається із двох фізичних тіл: повітря і огороження, теплофізичні властивості яких різняться між собою. Отже, теплообмін між повітрям зовнішнім і всередині зони витримки можна записати системою рівнянь у відхиленнях :

$$\left. \begin{aligned} c_{II} m_{II} \frac{d\Delta\theta_{II}}{dt} &= \Delta Q_1 - \Delta Q_2 - \Delta Q_3 \\ c_{OG} m_{OG} \frac{d\theta_{OG}}{dt} &= \Delta Q_3 - \Delta Q_4 \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

де c – теплоємність речовини, кДж / (кг × °C); m – маса речовини в об'ємі, кг; c_{OG} – питома теплоємність огороження, кДж / (кг °C); m_{II} – маса повітря, кг; m_{OG} – маса огороження, кг. $\Delta Q_1, \Delta Q_2, \Delta Q_3, \Delta Q_4$ – відхилення від розрахункових значень теплових потоків відповідно з повітрям, що надходить у зону витримки, від повітря усередині зони витримки до огорожі і від огорожі до зовнішнього повітря [4].

Система рівнянь (3) описує досліджуваний об'єкт із деякою ідеалізацією. При складанні рівнянь прийняті такі допущення: зона витримки залізобетонного виробу при тепловологісній обробці у формівному стенді розглядається як лінійний об'єкт із зосередженими параметрами; щільність повітря не залежить від температури і тиску усередині цеху; час переміщення повітря усередині зони витримки не враховується.

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

Для виведення динамічних характеристик об'єкта необхідно в систему рівнянь (3) підставити значення теплових потоків, виражаючи їх через питомі теплоємності, маси, перепади температури, поверхні теплопередачі і коефіцієнти теплообміну:

$$\left. \begin{aligned} c_{II} m_{II} \frac{d\Delta\theta_{II}}{dt} &= c_{II} \Delta m_{III} (\theta_{III} - \theta_{II}) - c_{II} \Delta m_{II} (\theta_{II} - \theta_{3OVH}) - F_{OG} \alpha_{BH} (\Delta\theta_{II} - \Delta\theta_{OG}) \\ c_{OG} m_{OG} \frac{d\theta_{OG}}{dt} &= F_{OG} \alpha_{BH} (\Delta\theta_{II} - \Delta\theta_{OG}) - F_{OG} \alpha_{3OVH} (\Delta\theta_{OG} - \Delta\theta_{3OVH}) \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

де c_{Π} – питома теплоємність повітря, кДж/(кг × °С); c_{OG} – питома теплоємність огорожі, кДж / (кг °С); m_{Π} – маса повітря усередині зони витримки, кг; m_{OG} – маса огорожі (стіл і склепіння), кг; Δm_{III} , Δm_I – приріст маси поданого і внутрішнього повітря, кг/С; F_{OG} – площа огорожі, M^2 ; α_{BH} , α_{3OBH} – коефіцієнти теплообміну внутрішніх і зовнішніх поверхонь огорожі, Вт / (м °С); $\Delta\theta_{3OBH}$, $\Delta\theta_{\Pi}$, $\Delta\theta_{OG}$ – приріст температури зовнішнього і внутрішнього повітря (при подачі повітря через нагрівальну або охолоджувальну установку, температура поданого повітря θ_{III} відрізняється від температури зовнішнього повітря θ_{3OBH}).

З огляду на те, що $\Delta m_{\Pi} = \Delta m_{III}$, можна спростити перше рівняння системи (4):

$$c_{\Pi} m_{\Pi} \frac{d\Delta\theta_{\Pi}}{dt} = c_{\Pi} \Delta m_{III} (\theta_{III} - \theta_{\Pi}) - c_{\Pi} \Delta m_{\Pi} (\theta_{\Pi} - \theta_{3OBH}) - F_{OG} \alpha_{BH} (\Delta\theta_{\Pi} - \Delta\theta_{OG}), \quad (5)$$

з якого:

$$\Delta\theta_{OG} = \frac{c_{\Pi} m_{\Pi} d\Delta\theta_{\Pi}}{F_{OG} \alpha_{BH} dt} + \Delta\theta_{\Pi} - \frac{c_{\Pi} m_{\Pi} (\theta_{III} - 2\theta_{\Pi} + \theta_{3OBH})}{F_{OG} \alpha_{BH}}, \quad (6)$$

Підставляючи значення $\Delta\theta_{OG}$ в друге рівняння системи (4), одержимо:

$$\begin{aligned} & \frac{c_{OG} m_{OG} c_{\Pi} m_{\Pi}}{F_{OG}^2 \alpha_{BH} \alpha_{3OBH}} * \frac{d^2 \Delta\theta_{\Pi}}{dt^2} + \frac{c_{OG} m_{OG} \alpha_{BH} + c_{\Pi} m_{\Pi} (\alpha_{BH} + \alpha_{3OBH})}{F_{OG} \alpha_{BH} \alpha_{3OBH}} * \frac{d\Delta\theta_{\Pi}}{dt} + \Delta\theta_{\Pi} = \\ & = \frac{c_{\Pi} (\alpha_{BH} + \alpha_{3OBH}) (\theta_{III} - 2\theta_{\Pi} + \theta_{3OBH})}{F_{OG} \alpha_{BH} \alpha_{3OBH}} * \left[\frac{c_{OG} m_{OG}}{F_{OG} (\alpha_{BH} + \alpha_{3OBH})} * \frac{d\theta_{\Pi}}{dt} + \Delta m_{\Pi} \right] + \Delta\theta_{\Pi}. \end{aligned} \quad (7)$$

У канонічній формі рівняння динаміки зони витримки формівного стенду має вигляд:

$$T_0^2 \frac{d^2 \Delta\theta_{\Pi}}{dt^2} + T_1 \frac{d\Delta\theta_{\Pi}}{dt} + \Delta\theta_{\Pi} = k \left(T_2 \frac{d\theta_{\Pi}}{dt} + \Delta m_{\Pi} \right) + \theta_{3OBH}. \quad (8)$$

де

$$T_0^2 = \frac{c_{OG} c_{\Pi} m_{OG} m_{\Pi}}{F_{OG}^2 \alpha_{BH} \alpha_{3OBH}}; \quad (9)$$

$$T_1 = \frac{c_{OG} m_{OG} \alpha_{BH} + c_{\Pi} m_{\Pi} + c_{\Pi} m_{\Pi} \alpha_{3OBH}}{F_{OG} \alpha_{BH} \alpha_{3OBH}}; \quad (10)$$

$$T_2 = \frac{c_{OG} m_{OG}}{F_{OG} (\alpha_{BH} \alpha_{3OBH})}; \quad (11)$$

$$k = \frac{c_{\Pi} (\alpha_{BH} \alpha_{3OBH}) (\theta_{III} - 2\theta_{\Pi} + \theta_{3OBH})}{F_{OG} \alpha_{BH} \alpha_{3OBH}}; \quad (12)$$

Передатна функція зони витримки формівного стенду по керуючому впливу має вигляд

$$W(p) = \frac{\Delta\theta_I(\partial)}{\Delta m_I(\partial)} = \frac{k(T_2 p + 1)}{T_0^2 p^2 + T_1 p + 1}. \quad (13)$$

Значення коефіцієнтів, що входять у передатну функцію:

$$V_{\Pi} = 9\,000 \text{ м}^3;$$

$$\alpha_{BH} = 2\,000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С});$$

$$V_{OG} = 1,62 \text{ м}^3; \quad \alpha_{3OBH} = 2\,000 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°C)};$$

$$m_{II} = 0,012 \text{ кг}; \quad F_{OG} = 2,4 \text{ м}^2;$$

$$m_{OG} = 4\,698 \text{ кг}; \quad \theta_{III} = 55\text{°C};$$

$$c_{II} = 1,005 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{°C)}; \quad \theta_{II} = 90\text{°C};$$

$$c_{OG} = 0,9 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{°C)}; \quad \theta_{3OBH} = 20\text{°C}.$$

$$k = \frac{1,005 \times (2000 + 2000)(55 - 2 \times 90 + 20)}{2,4 \times 2000 \times 2000} = 0,0607; \quad (14)$$

$$T_1 = \frac{0,9 \times 4698 \times 2000 + 1,005 \times 0,012 + 1,005 \times 0,012 \times 2000}{2,4 \times 2000 \times 2000} = 0,88 \text{ (с)} \quad (15)$$

$$T_2 = \frac{0,9 \times 4698}{2,4 \times (2000 + 2000)} = 0,44 \text{ (с)}; \quad (16)$$

$$T_0^2 = \frac{0,9 \times 4698 \times 1,005 \times 0,012}{(2,4)^2 \times 2000 \times 2000} = 0,0022 \text{ (с)}. \quad (17)$$

У результаті розрахунків за вищенаведеними формулами виходить:

$T_0 = 0,0022 \text{ (с)}; T_1 = 0,88 \text{ (с)}; T_2 = 0,44 \text{ (с)}; k = 0,0607$

Передатна функція об'єкта регулювання (ОР):

$$W(p) = \frac{0,0267 p + 0,0607}{0,0022 p^2 + 0,88 p + 1}. \quad (18)$$

Кожна система автоматичного регулювання складається з регулятора та об'єкта управління (ОУ). Критерієм для правильного вибору закону регулювання може служити значення відношення часу чистого запізнення об'єкта до його постійної часу t / T . Якщо це відношення менше 0,2, то вибирають регулятор позиційної дії, при значенні відношення більше 1 – імпульсного типу, якщо ж $0,2 < t / T < 1$, то регулятор безперервної дії. Оскільки в нашому випадку T складає приблизно 25 % від t , вибираємо регулятор безперервної дії.

Для виконання оптимізації системи управління процесом витримки залізобетонного виробу, розглянутої в [2; 3; 6], розроблено структурну схему системи автоматичного регулювання (САР) (рис. 1).

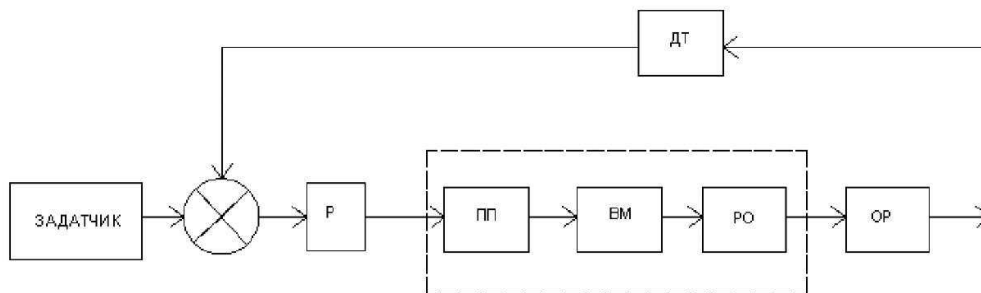


Рис. 1. Структурна схема САР витримки залізобетонного виробу

де: ПП – підсилювач потужності, пускач; ВМ – виконавчий механізм; Р – регулятор, комп'ютер; РО – регулювальний орган, заслінка; ОР – об'єкт регулювання, зона витримки; ДТ – датчик температури, термометр опору.

Виконуємо розрахунок динамічних параметрів системи з подальшим їх моделюванням за допомогою прикладної програми Simulink моделювання MATLAB 6.5.[2; 3; 6]. Передатна функція датчика температури – це інтегральна ланка:

$$W(p) = \frac{k}{T * p + 1}; \quad (19)$$

$$k = \frac{X_{BHX}}{X_{BX}}; \quad (20)$$

$$T = 40(c); \quad (21)$$

$$W_{DT}(p) = \frac{0,004}{40 * p + 1}. \quad (22)$$

Передатна функція виконавчого механізму – це інтегральна ланка:

$$W_{BM,PO}(p) = \frac{k}{T * p + 1}; \quad (23)$$

$$W_{BM,PO}(p) = \frac{0,055}{50 * p + 1}. \quad (24)$$

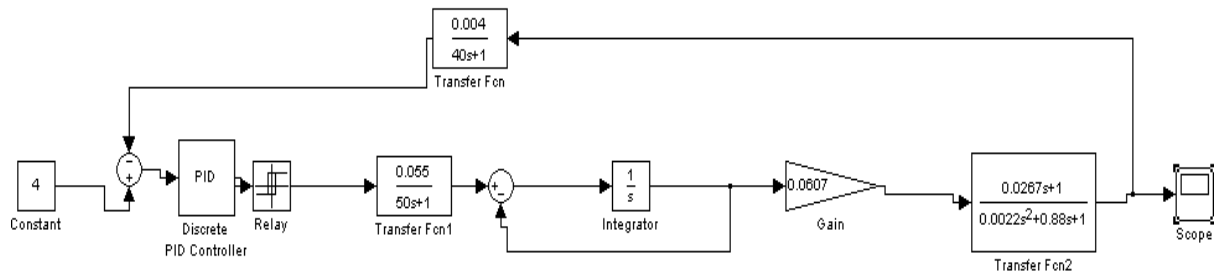


Рис. 2. Блок-схема моделі САР витримки залізобетонного виробу, реалізована в MATLAB 6.5

Пускач представлено у вигляді блока логіки з підсилювачем. Регулятор представлений на схемі блоком PID – Controller. Результати моделювання можна побачити на рисунках 3, 4.

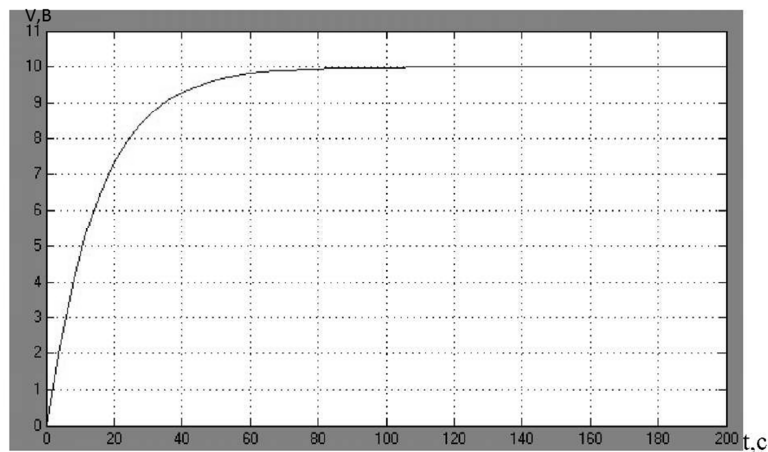


Рис. 3. Перехідний процес системи до оптимізації

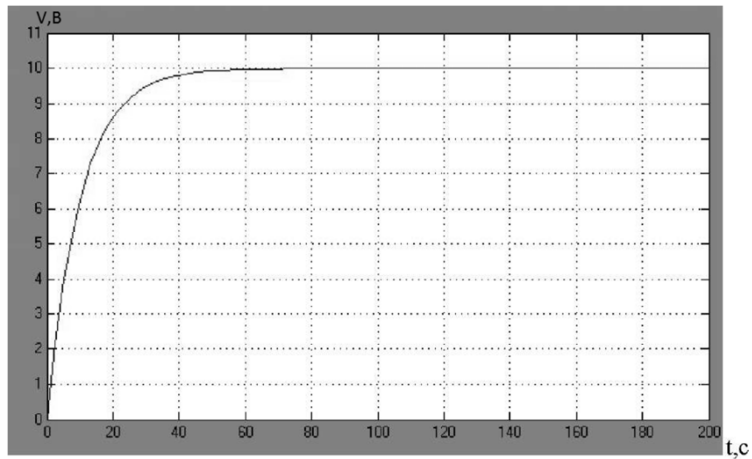


Рис. 4. Перехідний процес після оптимізації

Для того, щоб температура змінювалась за заданим законом та за певним проміжком часу, у блок-схему моделі витримки залізобетонного виробу потрібно додати регулятор. Даний регулятор складається з блоків пакета моделювання динамічних систем. Реалізація процесу регулювання виконана в програмному середовищі MATLAB 6.5. Simulink, що дозволяє наочно спостерігати закони зміни температури всередині і на поверхні залізобетонного виробу у формівному стенді.

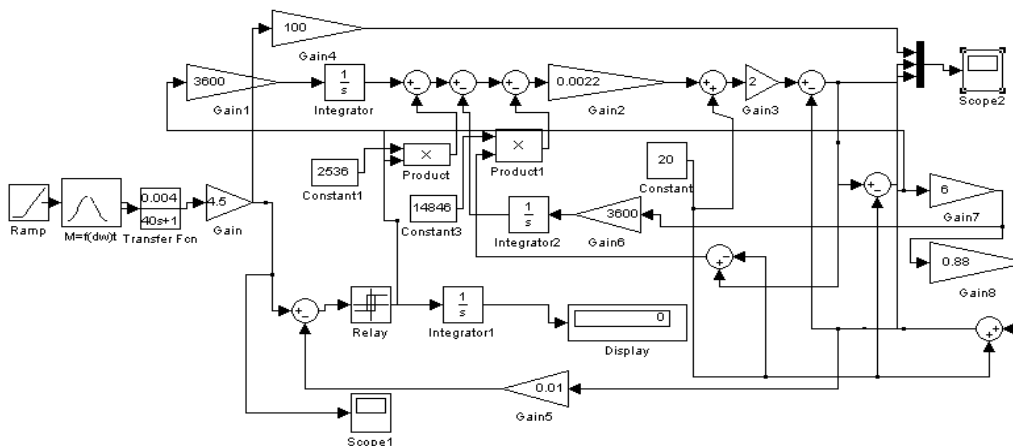


Рис. 5. Блок-схема моделі витримки залізобетонного виробу у формівному стенді з регулятором, реалізована в середовищі Simulink

Дану модель можна використовувати для уточнення завдання початкових і граничних умов для математичної моделі витримки залізобетонного виробу, що дозволяє визначити більш чітку картину витримки залізобетонного виробу у формівному стенді в процесі тепловологісної обробки. Результати моделювання можна побачити на рисунку 6.

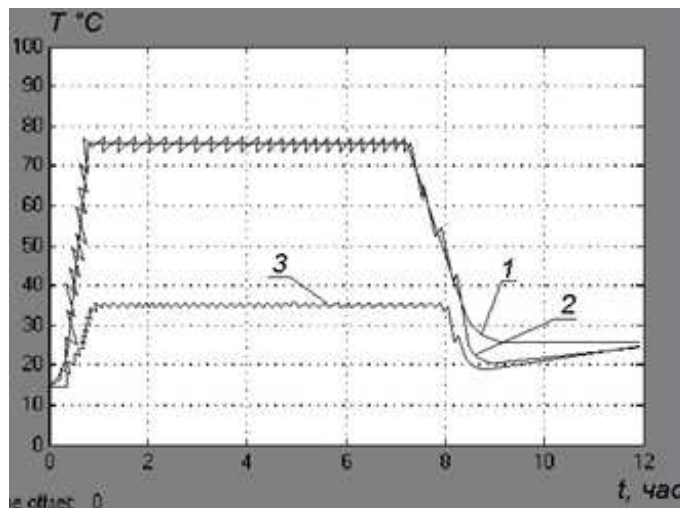


Рис. 6. Графік зміни температури у часі: 1 – графік залежності температури у формівному стенді від часу; 2 – графік сигналу управління; 3 – графік залежності температури на поверхні формівного стенда від часу

Із характеристики видно, що весь процес тепловологої обробки залізобетонного виробу у формівному стенді поділяється на три основні періоди. Перший з них – період прогрівання, температура поступово збільшується до 77°C. Другий – період ізотермічної витримки залізобетонного виробу. Протягом цього періоду температура залишається постійною – 77°C. Третій період називають періодом охолодження залізобетонного виробу. Під час цього періоду температура спадає до 23 °C.

Висновки. У результаті математичного моделювання було знайдено передатну функцію системи автоматизованого управління процесу витримки залізобетонного виробу при тепловологій обробці у формівному стенді, побудовано перехідний процес. За допомогою програми MATLAB 6.5 проведено оптимізацію системи, зменшено час регулювання із 72 до 61 секунд, що допоможе поліпшити якість регулювання процесу витримки залізобетонного виробу при тепловологісній обробці у формівному стенді, зменшить витрати теплоносія.

Була розроблена і реалізована в програмі MATLAB 6.5 блок-схема моделі витримки залізобетонного виробу у формівному стенді з регулятором, за допомогою якого здійснено регулювання температури всередині і на поверхні формівного стенда. Це дозволило поліпшити якість процесу витримки залізобетонного виробу.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. **Бейко І. В.** Методы и алгоритмы задач оптимизации / И. В. Бейко, Б. М. Бублик. – К. : Вища школа, 1983. – 512 с.
2. **Дьяконов В. М.** Simulink 4: специальный справочник / В. М. Дьяконов. – С-Пб. : Питер, 2002. – 528 с.
3. **Дьяконов В. М.** MATLAB 6: учебный курс / В. М. Дьяконов. – С-Пб. : Питер, 2001. – 592 с.
4. **Мартыненко И. И.** Проектирование систем автоматики / И. И. Мартыненко, В. Ф. Лысенко. – М. : Агропромиздат, 1990. – 243 с.
5. **Ралко А. В.** Тепловые процессы в технологии силикатов / А. В. Ралко, А. А. Крупа. – К. : Вища школа, 1986. – 232 с.
6. **Ужеловський В. О., Ткачов В. С., Бровченко К. А.** Методичні вказівки до визначення динамічних параметрів об'єктів регулювання для студентів фаху 6.092500 / В. О. Ужеловський, В. С. Ткачов, К. А. Бровченко. – Д. : ПДАБА, 2007. – 31 с.
7. Пат. 551550 СССР, УДК 66.047.012.(088.8). Способ автоматического управления тепловой обработкой / В. П. Абрамов, В. В. Шмалько; заявл. 18.12.82; опубл. 15.01.84, Бюл. № 2.

УДК624.048:624.012.45

Математичне моделювання процесу витримки залізобетонного виробу при тепловологій обробці у формівному стенді / Л. І. Чумак, Н. М. Латиш // Вісник Придніпровської академії будівництва та архітектури. – Д. : ПДАБА, 2013. – № 6. – С. 7 – 13. – рис. 6. – Бібліогр.: (7 назв.).

Розроблено та проведено дослідження математичної моделі процесу витримки залізобетонного виробу при тепловологій обробці у формівному стенді, враховуючи динаміку процесу для визначення параметрів устаткування і раціонального закону регулювання, щоб підвищити якість залізобетонного виробу та зменшити економічні затрати. Дослідження проведено в програмі MATLAB 6 Simulink.

***Ключові слова:** математична модель, тепловолога обробка, витримка, залізобетонний виріб, регулювання, температура, оптимізація.*

Математическое моделирование процесса выдержки железобетонного изделия при тепловлажностной обработке в формовочном стенде / Л. И. Чумак, Н. М. Латыш // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д. : ПГАСА 2013. – № 6. – С. 7 – 13. – рис. 6. – Библиогр.: (7 назв.).

Разработаны и проведены исследования математической модели процесса выдержки железобетонного изделия при тепловлажностной обработке в формовочном стенде, учитывая динамику процесса для определения параметров оборудования и рационального закона регулирования, чтобы повысить качество железобетонного изделия и уменьшить экономические затраты. Исследование проведено в программе MATLAB 6 Simulink.

***Ключевые слова:** математическая модель, тепловлажностная обработка, выдержка, железобетонное изделие, регулирование, температура, оптимизация.*

Mathematical modeling of the aging concrete products for the treatment of heat and humidity in the molding stand / L. I. Chumak, N. M. Latysh // Visnyk of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture. – D. : PSACEA, 2013. – № 6. – P. 7 – 13. – pic. 6. – Bibliogr.: (7 names).

Developed and studied a mathematical model of aging concrete products for the treatment of heat and humidity in the molding stand, given the dynamics of the process for determining the parameters of the equipment and management control law in order to improve the quality of concrete products and reduce the economic costs. The study was conducted in MATLAB 6 Simulink.

***Key words:** mathematical model, steam curing, shutter speed, concrete products, regulation, temperature, optimization.*